
Informationsübertragung mit Energie-Budget-Management

- Die vorliegende Erfindung betrifft ein Verfahren zur Übertragung einer Vielzahl von Symbolen mit je mindestens einem Bit von einem Sender zu mindestens einem Empfänger unter Verwendung mindestens eines Kanals und ein Verfahren zur Organisation eines Netzwerkes, bei dem für jede Übertragung einer
- 5 Vielzahl von Symbolen mit je mindestens einem Bit von einem Sender zu mindestens einem Empfänger unter Verwendung mindestens eines Kanals Symbole gesendet werden. Weiterhin betrifft die Erfindung einen Sender, einen Empfänger und ein Sende- und Empfangssystem zur Durchführung des Verfahrens.
- 10 Die Nachrichtentechnik beschäftigt sich allgemein mit der Übertragung von Informationen von einer Nachrichten-Quelle, einem Sender, zur Nachrichten-Senke, einem Empfänger. Das zur Übertragung verwendete Medium wird als Kanal bezeichnet.

Die verschiedenen Kanäle, die in der Nachrichtentechnik zur Übertragung von Informationen zwischen Sender und Empfänger verwendet werden können, unterscheiden sich wesentlich von einander. Drahtgebundene Verbindungen zeichnen sich einerseits durch wenige Störungen, andererseits durch eine nur begrenzte Bandbreite aus. Für drahtlose Verbindungen sind einerseits viele Störungen und Echos, andererseits eine relativ große Bandbreite charakteristisch. Weiterhin gibt es Glasfaserverbindungen mit extrem großen Bandbreiten und geringen Störungen.

Als Kanalressourcen werden beispielsweise die Bandbreite, die maximale Sendeleistung und die Zeit definiert. In speziellen Anwendungen wird stattdessen beispielsweise die spektrale Leistungsdichte oder die spektrale Energiedichte definiert.

Eine wirtschaftliche Verwendung der Kanalressourcen wird durch deren gemeinsame Nutzung für möglichst viele Verbindungen angestrebt. Insbesondere hat es sich bei großen Netzwerken wie örtlichen Telefonnetzen im Sinne einer möglichst weitgehenden Nutzung der zur Verfügung stehenden Kanal Kapazität als nicht sinnvoll erwiesen, jedem Teilnehmer im Rahmen einer leitungsvermittelten Verbindung einen festen Teil der vorhandenen Kanalkapazität zuzuordnen. Mit verschiedenen Multiplexing-Techniken wird bei vorbekannten Übertragungsmethoden Kanalkapazität auf die einzelnen Teilnehmer in einem LAN, WLAN, GSM-Netz, UMTS-Netz, Telefonnetz, usw. verteilt.

Bei allen Multiplex-Verfahren wird die vorhandene Kanalkapazität aufgeteilt. Bei den Verfahren TDMA (Time Division Multiple Access) und FDMA (Frequency Division Multiple Access) erfolgt diese Aufteilung auf der physikalischen Ebene, indem Zeitschlitze oder Frequenzbänder eingerichtet werden, die verschiedenen Nutzern zugeteilt werden. Außerdem gibt es CDMA (Code Division Multiple Access) Systeme, die diese Aufteilung durch die Kodierung realisieren, indem jedem Nutzer verschiedene, in speziellen Ausprägungen orthogonale Codes zugeordnet werden, so dass die für einen Empfänger be-

stimmte Nachricht bei empfängerseitiger Kenntnis des jeweiligen Codes von den für andere Empfänger bestimmten Nachrichten separiert werden kann.

Die Planung und Entwicklung eines Netzwerkes orientiert sich an den verschiedenen Kanaleigenschaften. Beispielsweise wird die Optimierung der Zellgröße in einem GSM-Netzwerk in Abhängigkeit von der geographischen Lage und damit der vorhandenen Teilnehmerdichte und der Mehrwegebedingungen vorgenommen. Dabei werden die Planungen auf den sog. „Worst-Case“ ausgerichtet. Das heißt, es wird eine maximale Entfernung im Netzwerk oder eine minimale Empfangsleistung (Sensitivity) vorgegeben. Das Netzwerk wird so dimensioniert, dass alle Teilnehmer die gleiche Symbolrate empfangen können.

Damit ist sichergestellt, dass auch solchen Empfängern, für die die schlechtesten Übertragungsbedingungen bestehen, noch ein Mindestmaß an Übertragungsqualität bereitgestellt werden kann. Die Übertragungsqualität ist beispielsweise anhand einer Fehl-Erkennungsrate, beispielsweise einer Bitfehler-rate (Bit Error Rate, BER) beim Empfänger quantifizierbar. Im Rahmen dieser Anmeldung werden die in der Fachwelt bekannten unterschiedlichen Arten von Fehlerraten unter dem Oberbegriff Fehl-Erkennungsrate zusammengefasst.

Der Stand der Technik im Gebiet des Kanal-Managements soll nun an einigen Beispielen erläutert werden.

a) WLAN Standard 802.11 b

Gemäß diesem Standard für lokale drahtlose Übertragungsnetze (Wireless local area network, WLAN) für die Übertragung von Daten im ISM-Band bei 2.45 GHz werden:

- CDMA Sequenzen verwendet, um gegen Mehrwegeausbreitung robust zu sein,

- ggf. RAKE-Receiver eingesetzt, um die Energie der einzelnen Mehrwegepfade optimal zu bündeln,
- fehlerkorrigierende Codes verwendet, um trotz einzelner Fehler im Datenstrom die korrekte Information zu entschlüsseln, und
- 5 • verschiedene Modulationsarten (BPSK, QPSK, CCK) eingesetzt, um je nach Qualität des Kanals die maximale oder eine den Anforderungen entsprechende Datenrate zu übermitteln.

Für einzelne Peer-to-Peer Verbindungen innerhalb eines Netzwerkes kann damit, je nach der Qualität des zur Verfügung stehenden Übertragungskanals,
10 die Datenrate den Gegebenheiten angepasst werden, so dass in einem Netzwerk verschieden schnelle Verbindungen dynamisch aufgebaut werden.

Bezogen auf die Eigenschaften des Übertragungskanals ist es damit möglich, entweder die maximale Datenrate von 11 Mbps zu übertragen, oder einen zusätzlichen Faltungscode einzusetzen und auf 5.5 Mbps zurückzugehen,
15 oder bei noch schlechteren Kanälen die höherstufige Modulation CCK zu vermeiden und nur mit QPSK oder sogar nur mit BPSK zu übertragen, so dass die Datenraten auf die während der Übertragung verwendete Symbolrate (1 MSps) zurück geht und nur noch 1 Mbps möglich ist. Dabei werden unter Beibehaltung der ursprünglichen Spreizung des Daten-Symbols verschiedene
20 Modulationsarten verwendet. Teilnehmer, die aufgrund einer zu großen Entfernung eine zu große Dämpfung aufweisen, können nicht mehr erreicht werden. Weiterhin ist die Kapazität des Kanals damit nicht optimal ausgeschöpft.

b) UMTS

Dieser Mobilfunkstandard (Universal Mobile Telecommunication Service) weist
25 ähnliche Eigenschaften auf wie der Standard 802.11 b. Im Mobilfunkbereich greift eine Vielzahl von Teilnehmern auf eine Basisstation zu. Hierzu wird ein CDMA (Code Division Multiple Access) -Verfahren verwendet, bei dem jeder

Teilnehmer einen festen Code dynamisch zugewiesen bekommt. Zusätzlich sind die Antennen der Basisstation so angeordnet, dass verschiedene Sektoren entstehen, die sich gegenseitig nur gering beeinflussen („Space-diversity“).

- 5 UMTS weist ein Powermanagement auf, mit dem versucht wird, die in der Basisstation empfangene Leistung aller Teilnehmer annähernd gleich zu halten. Dies ist für die Trennung der CDMA-Kanäle von entscheidender Bedeutung. Gleichzeitig wird versucht, alle Teilnehmer in einem Netzwerk auf eine möglichst geringe Sendeleistung abzustimmen.
- 10 Der Einsatz von langen CDMA Sequenzen und Rake-Empfängern ermöglicht diesem System eine gewisse Robustheit gegen die starke Mehrwegeausbreitung. Dennoch ist die Zellgröße hier stark eingeschränkt im Vergleich zum GSM. Die verwendete Bandbreite ist aufgrund eines eingesetzten Spreizverfahrens relativ groß. Dennoch verfügt jeder Teilnehmer aufgrund der verwendeten
- 15 CDMA-Sequenzen, die ein Datensymbol repräsentieren, nur über eine vergleichsweise stark reduzierte Datenrate.

- Eine Spreizung erfolgt, indem, bezogen auf die vorgegebene Bandbreite, kurze physikalische Symbole definiert werden, die als Chips bezeichnet werden. Die gesendeten, Information tragenden Symbole bzw. teilnehmerspezifischen
- 20 CDMA-Sequenzen erstrecken sich über mehrere Chips.

Das so konstruierte System ist starr und garantiert jedem Teilnehmer einer Zelle die Einhaltung der minimalen Übertragungsqualität. Dass dies in modernen Netzen nicht mehr ausreicht, war den Entwicklern jedoch bewusst, so dass hier dynamische Gestaltungsmöglichkeiten zusätzlich eingebaut wurden.

- 25 Eine Besonderheit des UMTS ist es, eine Kanalbündelung zu gestatten. Einem einzelnen Nutzer werden dabei mehrere logische Kanäle zugewiesen. Damit dieser nicht parallel mehrere CDMA Sequenzen empfangen muss, werden hier verkürzte Sequenzen verwendet. Dadurch wird die Datenrate ange-

hoben. Auf diese Weise kann so genannten "Power Usern" gegen eine entsprechende Gebühr eine höhere Datenrate angeboten werden.

Andererseits sinkt mit solcherart erhöhter Datenrate auch die Robustheit der Datenübertragung. Die erhöhte Datenrate ist daher nur bei Kanälen verfügbar,
5 die eine hinreichend gute Qualität, also eine geringe Rauschleistung aufweisen. Weiterhin nehmen die Störungen gegenüber anderen Nutzern zu und steigt der Managementaufwand gewaltig, weil nur spezielle Kanäle zur Bündelung herangezogen werden können, die alle den neuen verkürzten Code enthalten müssen. Entscheidend aber ist, dass die vorhandenen Kanalressourcen
10 hier nicht optimal genutzt werden..

Aus der DE 199 37 706 A1 ist ein Übertragungsverfahren mit senderseitiger Frequenz- und Zeitspreizung bekannt. Bei diesem auch als Multidimensional Multiple-Access-Verfahren (MDMA) bezeichneten Übertragungsverfahren werden die zu übertragenden Informationssymbole senderseitig einer Frequenzspreizung und einer Zeitspreizung unterzogen. Den einzelnen Teilnehmern
15 kann weiterhin eine unterschiedliche Sendeleistung zugewiesen werden. Empfängerseitig werden die Empfangssignale entspreizt. Die jeweiligen Spreizungen und damit der Systemgewinn können adaptiv auf die geforderte Übertragungsqualität und die aktuellen Kanaleigenschaften abgestimmt werden. Das Maß der Zeitspreizung kann beim Herstellen einer Verbindung zwischen einer Basisstation und einer Teilnehmerstation in Abhängigkeit von Referenzimpulsen erfolgen, die zur Ermittlung der Kanaleigenschaften dienen.
20

MDMA erlaubt es, sich jedem Erfordernis innerhalb eines Netzes sowie jedem Teilnehmer und dessen Qualitätsanforderungen anzupassen. MDMA stellt
25 also eine Maschine dar, die technisch dazu gebraucht werden kann, jeden Teilnehmer optimal zu versorgen.

Das allein genügt jedoch noch nicht. Die Frage stellt sich: Wie muss ein Netzwerk gemanagt werden, damit die wertvollen Nutzen für die Kunden wie Datenrate, Reichweite, Fehlersicherheit, Robustheit usw. optimal geboten wer-

den können? D.h. wie muss die Maschine organisatorisch arbeiten, um die Flexibilität von MDMA in einen ökonomischen Vorteil zu verwandeln?

Das der Erfindung zugrunde liegende technische Problem ist es daher, ein Verfahren zur Übertragung mindestens eines Symbols von einem Sender zu
5 mindestens einem Empfänger bereitzustellen, das eine den Übertragungsbedingungen zwischen Sender und jeweiligem Empfänger entsprechend möglichst hohe Datenrate bereit stellt. Daraus folgt als weiterer Aspekt des der Erfindung zugrunde liegenden technischen Problems, ein Verfahren zur Organisation eines Netzwerkes anzugeben, das jedem beliebigen Teilnehmer innerhalb eines Netzwerkes eine den Übertragungsbedingungen zwischen
10 Sender und jeweiligem Empfänger entsprechend möglichst hohe Datenrate bereit stellt und dabei die zur Verfügung stehenden Kanalarressourcen besser ausnutzt.

Gemäß einem ersten Aspekt der Erfindung wird ein Verfahren zur Übertragung einer Vielzahl von Symbolen mit je mindestens einem Bit von einem
15 Sender zu mindestens einem Empfänger unter Verwendung mindestens eines Kanals und einer vorgegebenen Sendeleistung vorgeschlagen,
- bei dem die Symbole mit einer empfängerspezifischen Sendeenergie gesendet werden, die auf Seiten des Empfängers zum Empfang des Symbols mit einer Empfangsenergie führt, welche einem dem Empfänger zugeordneten
20 oberen Grenzwert oder einem geringeren Wert einer Fehl-Erkennungsrate entspricht, und
- bei dem zur Erzielung der empfängerspezifischen Sendeenergie und gleichzeitig einer möglichst hohen Bitrate in Abhängigkeit von aktuellen Übertragungsbedingungen zwischen Sender und Empfänger die Symboldauer, oder
25 die Anzahl je Symbol übertragener Bits, oder die Symboldauer und die Anzahl je Symbol übertragener Bits angepasst wird.

Gemäß einem zweiten Aspekt der Erfindung wird ein Verfahren zur Organisation eines Netzwerkes vorgeschlagen, bei dem für jede Übertragung einer
30 Vielzahl von Symbolen mit je mindestens einem Bit von einem Sender zu min-

- destens einem Empfänger unter Verwendung mindestens eines Kanals und einer vorgegebenen Sendeleistung die Symbole gesendet werden
- mit einer empfängerspezifischen Sendeenergie, die auf Seiten des Empfängers zum Empfang des Symbols mit einer Empfangsenergie führt, welche einem dem Empfänger zugeordneten oberen Grenzwert oder einem im Vergleich mit dem oberen Grenzwert geringeren Wert der auftretenden Fehl-Erkennungsrate entspricht,
 - wobei in Abhängigkeit von aktuellen Übertragungsbedingungen zwischen Sender und jedem einzelnen Empfänger zur Erzielung der empfängerspezifischen Sendeenergie und gleichzeitig einer möglichst hohen Bitrate die Symboldauer, oder die Anzahl je Symbol übertragener Bits, oder die Symboldauer und die Anzahl je Symbol übertragener Bits angepasst wird.

- Die beiden vorgeschlagenen Verfahren fußen auf derselben Erfindung. Das erfindungsgemäße Verfahren gemäß dem ersten Aspekt der Erfindung, nachfolgend als erfindungsgemäßes Übertragungsverfahren bezeichnet, gibt eine technische Regel für die Datenübertragung zwischen einem Sender und mindestens einem Empfänger an. Die Verwendung dieser technischen Regel in einem Netzwerk für jede Übertragung einer Vielzahl von Symbolen zwischen einem Sender und mindestens einem Empfänger bildet darauf aufbauend eine technische Regel für die Organisation des Netzwerkes gemäß dem Verfahren nach dem zweiten Aspekt der Erfindung. Das letztere Verfahren wird nachfolgend auch als das erfindungsgemäße Netzwerkorganisationsverfahren bezeichnet.

- Der Einsatz des Übertragungsverfahrens der Erfindung kann auch ohne Verwendung des erfindungsgemäßen Netzwerkorganisationsverfahrens erfolgen, indem nicht bei jeder Übertragung das erfindungsgemäße Übertragungsverfahren eingesetzt wird.

- Es versteht sich, dass die Verwendung des erfindungsgemäßen Netzwerkorganisationsverfahrens den Einsatz des Übertragungsverfahrens voraussetzt. Denn das Netzwerkorganisationsverfahren betrifft jede Datenübertragung im

Netzwerk. Der Einsatz des Netzwerkorganisationsverfahrens ermöglicht ein Maximum an Effizienzsteigerung, wie weiter unten ausführlich erläutert wird.

Nachfolgend sollen zum besseren Verständnis der Erfindung einige verwendete Begriffe näher erläutert werden.

- 5 Unter einem Symbol im Sinne der Erfindung ist ein Signal zu verstehen, das ein logisches Symbol repräsentiert, wenn nichts anderes gesagt ist. Ein logisches Symbol kann ein oder mehrere Bits enthalten.

10 Die Übersendung von Symbolen mit einer empfängerspezifischen Sendeenergie bedeutet, dass grundsätzlich für jeden einzelnen Empfänger individuell die Sendeenergie bestimmt wird. Die Bestimmung der Sendeenergie erfolgt erfindungsgemäß mit der Maßgabe, dass auf Seiten des Empfängers ein Empfang des Symbols mit einer Empfangsenergie erfolgt, welche einem dem Empfänger zugeordneten oberen Grenzwert oder einem geringeren Wert einer Fehl-Erkennungsrate entspricht.

- 15 Dies schließt nicht aus, dass für eine Gruppe mehrerer Empfänger dieselbe Sendeenergie bestimmt wird, wenn beispielsweise für diese Gruppe von Empfängern mit etwa gleichem Abstand von einem Sender gleiche aktuelle Übertragungsbedingungen bestehen.

20 Unter der vorgegebenen Sendeleistung ist in Abgrenzung von bekannten Powermanagement-Verfahren eine im Rahmen der erfindungsgemäßen Verfahren nicht veränderbare, im zeitlichen Mittel eingehaltene Sendeleistung zu verstehen. Ist zusätzlich oder alternativ eine Obergrenze der Spitzenleistung vorgegeben, wird diese im Rahmen der erfindungsgemäßen Verfahren eingehalten. Es ist jedoch denkbar, dass die Sendeleistungsvorgabe extern geändert wird, worauf hin die erfindungsgemäßen Verfahren durch Anpassung
25 der Symboldauer oder der Anzahl der Bits pro Symbol oder durch Anpassung beider Parameter entsprechend reagieren. Weiter unten sind verschiedene, die Sendeleistungsvorgabe betreffende Ausführungsbeispiele erläutert.

Die aktuellen Übertragungsbedingungen sind durch alle Parameter definiert, die die momentane empfängerseitige Fehl-Erkennungsrate beeinflussen. Einfluss auf die Übertragungsbedingungen haben beispielsweise der Abstand zwischen Sender und Empfänger (Abstandsdämpfung), Mehrwegeausbreitung
5 und daraus resultierende Interferenzeffekte beim Empfänger, Störungen, beispielsweise von benachbarten Sendern, und Rauschen, Abschattungseffekte aufgrund von Hindernissen im Signalweg, Kanalinterferenzen und Systeminterferenzen, sowie die verwendete Modulationsart und die zeitliche Dauer der Symbole.

10 Als oberer Grenzwert einer Fehl-Erkennungsrate kann beispielsweise ein Wert einer Bitfehlerrate (Bit Error Rate, BER), einer Rahmenfehlerrate (Frame Error Rate, FER) oder einer Blockfehlerrate (Block Error Rate, BLER) oder jeder äquivalenten Größe mit der Bedeutung einer Fehl-Erkennungsrate verwendet werden.

15 Die Zuordnung eines Grenzwerts einer Fehl-Erkennungsrate zu einem Empfänger ergibt sich beispielsweise aus einer dem Nutzer des Empfängers vertraglich garantierten maximalen Fehl-Erkennungsrate oder aus einem mit der Datenübertragung zwischen Sender und Empfänger verbundenen Dienst-Typ (Telefongespräch, e-mail, Multimedia-Datenübertragung, Datenübertragung
20 im Rahmen einer Sicherheitsanwendung etc.).

Unter der möglichst hohen Datenrate ist diejenige Datenrate zu verstehen, die bei Verwendung der vorgegebenen Sendeleistung und der empfängerspezifischen Sendeenergie pro Symbol unter Einhaltung der dem Empfänger zugeordneten maximalen Fehl-Erkennungsrate die höchst mögliche ist. Das
25 bedeutet, dass die Datenrate im Gegensatz zu vorbekannten Verfahren von Empfänger zu Empfänger variieren kann. Dies wird weiter unten anhand der Figuren näher erläutert.

Nachfolgend wird die erfindungsgemäße Lösung zunächst näher beleuchtet, bevor Ausführungsbeispiele beschrieben werden.

Das Übertragungsverfahren der Erfindung wendet sich von den bekannten Leistungsregelungsverfahren (Powermanagement) ab. Unter anderem steuern beispielsweise die bekannten Verfahren GSM oder CDMA die Leistung des Senders. Dies ist ökonomisch ineffizient für einen Netzbetreiber. Denn
5 durch eine Regelung der Sendeleistung im Rahmen des Powermanagements kann die einem Netzbetreiber zur Verfügung stehende Kanalkapazität nicht optimal genutzt werden. Weiterhin liegt der vorliegenden Erfindung die konsequente Umsetzung der Erkenntnis zugrunde, dass für die Erzielung eines oberen Grenzwertes einer Fehl-Erkennungsrate auf Seiten des Empfängers
10 nicht die Empfangsleistung sondern die Empfangsenergie pro Bit entscheidend ist.

Erfindungsgemäß wird daher vorgeschlagen, eine empfängerspezifische Regelung der Sendeenergie eines zu übertragenden Symbols durch Anpassung der Symboldauer oder durch Anpassung der Anzahl der mit dem Symbol übertragene
15 Bits oder durch beide Maßnahmen in Kombination vorzunehmen, jeweils unter Verwendung einer vorgegebenen Sendeleistung. Im Ergebnis bewirkt jede der vorgesehenen Maßnahmen zur Einstellung der Sendeenergie eine Anpassung der Symboldauer pro Bit, also des Verhältnisses der Symboldauer zur Anzahl der darin enthaltenen Bits. Maßgeblich für die Anpassung ist
20 jeweils die Einhaltung, in einer Verfahrensalternative die Unterschreitung, eines oberen Grenzwertes einer dem jeweiligen Empfänger zugeordneten Fehl-Erkennungsrate, bei Verwendung der vorgegebenen Sendeleistung, sowie die Erzielung einer möglichst hohen Datenrate. Das erfindungsgemäße Übertragungsverfahren kann daher zur Verdeutlichung der Abgrenzung von Powermanagement-Verfahren auch als Energiemanagement in Form eines Bit-Dauer-Managements (Bit Duration Management, BDM) bezeichnet werden.
25 Dies ist ein gravierender Unterschied gegenüber vorbekannten Verfahren, der eine völlig neue Netzwerkorganisation bedeutet und ermöglicht.

Auf der Basis des Bit-Dauer-Managements ermöglicht das erfindungsgemäße
30 Netzwerkorganisationsverfahren eine effizientere Nutzung der einem Netzbetreiber zur Verfügung stehenden Kanalkapazität. In einem Netzwerk

besteht die Aufgabe darin, eine Vielzahl Teilnehmer in einer bestimmten Zeitspanne mit einer bestimmten Informationsmenge zu versorgen. Die bestimmte Zeitspanne bedingt bei vorgegebener Sendeleistung ein Energie-Budget, das in Summe für alle Teilnehmer zur Verfügung steht. Das erfindungsgemäße

5 Netzwerkorganisationsverfahren optimiert jeden Kanal empfängerspezifisch, und zwar derart, dass jedem für einen Teilnehmer bestimmten Symbol die zur Erzielung der vorgegebenen Fehl-Erkennungsrate und einer möglichst schnellen Datenübertragung, das heißt einer möglichst hohen Datenrate, erforderliche Energie zugewiesen wird. Auf diese Weise wird erreicht, dass im Ver-

10 gleich mit bekannten Netzwerkorganisationsverfahren entweder eine größere Informationsmenge übertragen werden kann oder mehr Teilnehmer versorgt werden können.

Dies gelingt nicht durch eine Regelung der Sendeleistung, weil ein Herabsetzen der Sendeleistung unter die Sendeleistungsvorgabe im Rahmen des Powermanagements die Ressource Sendeleistung und damit die verfügbare Kanalkapazität nicht voll nutzt. Eine volle Nutzung gelingt nur bei Einhaltung der

15 Sendeleistungsvorgabe.

Das erfindungsgemäße Netzwerkorganisationsverfahren nutzt so die dem Netzbetreiber als Energie-Budget zur Verfügung stehenden Größen Sendeleistung und Zeit in verbesserter Weise. Das Netzwerkorganisationsverfahren der Erfindung wird daher nachfolgend auch als Energie-Budget-

20 Management (EBM) bezeichnet.

Im folgenden werden Ausführungsbeispiele der erfindungsgemäßen Verfahren näher beschrieben. Da das Übertragungsverfahren gewissermaßen die Elementarzelle des Netzwerkorganisationsverfahrens bildet, beziehen sich die

25 nachfolgend beschriebenen Ausführungsbeispiele sowohl auf das Übertragungsverfahren als auch auf das Netzwerkorganisationsverfahren der Erfindung.

Jeder der drei vorgeschlagenen Maßnahmen zur Anpassung der Sendeenergie, die eine Änderung der Symboldauer pro Bit bewirken, entspricht gemäß der Erfindung ein selbständiges Übertragungsverfahren. Eine Kombination der Anpassungsalternativen ist vorteilhaft, aber nicht notwendig.

- 5 In einem ersten Ausführungsbeispiel des erfindungsgemäßen Übertragungsverfahrens ist daher vorgesehen, allein die Symboldauer anzupassen. In einem zweiten Ausführungsbeispiel ist vorgesehen, allein die Anzahl der Bits pro Symbol anzupassen. In einem dritten Ausführungsbeispiel werden zugleich die Anzahl der Bits pro Symbol und die Symboldauer angepasst.
- 10 In weiteren Ausführungsbeispielen des erfindungsgemäßen Übertragungsverfahrens ist ein Auswahlschritt vorgesehen, bei dem zwischen zwei oder drei der genannten Anpassungsmöglichkeiten gewählt wird: In einem vierten Ausführungsbeispiel findet wahlweise allein eine Anpassung der Symboldauer oder allein eine Anpassung der Anzahl Bits pro Symbol Anwendung. In einem
- 15 fünften Ausführungsbeispiel findet wahlweise allein eine Anpassung der Symboldauer oder eine Anpassung der Symboldauer und zugleich der Anzahl Bits pro Symbol Anwendung. In einem sechsten Ausführungsbeispiel findet wahlweise allein eine Anpassung der Anzahl Bits pro Symbol oder eine Anpassung der Symboldauer und zugleich der Anzahl Bits pro Symbol Anwendung. In einem
- 20 siebten Ausführungsbeispiel findet wahlweise allein eine Anpassung der Symboldauer oder allein eine Anpassung der Anzahl der Bits pro Symbol oder eine Anpassung der Bitdauer und zugleich der Anzahl Bits pro Symbol Anwendung.

- Bevorzugt kann in einem weiteren Ausführungsbeispiel zwischen mehreren
- 25 oder allen der vorgenannten Ausführungsbeispiele gewechselt werden.

Nachfolgend werden einige die Sendeleistungsvorgabe betreffende Ausführungsbeispiele erläutert.

Bei einer Ausführungsform der Erfindung ist kanalspezifisch die Sendeleistung und/oder elektrischen Feldstärken und/oder magnetischen Feldstärken und/oder spektralen Leistungsdichten im zeitlichen Mittel und im Rahmen zulässiger Leistungsabstrahlung maximal. Die zulässigen Sendeleistungen
5 und/oder elektrischen Feldstärken und/oder magnetischen Feldstärken und/oder spektralen Leistungsdichten sind durch Regulierungsbehörden vorgegeben. Beim erfindungsgemäßen Netzwerkorganisationsverfahren, dem Energie-Budget-Management, wird auf diese Weise eine maximale Ausnutzung des zur Verfügung stehenden Energie-Budgets erzielt. Die zeitliche Mit-
10 telung bezieht sich auf solche Zeitabschnitte, deren Kehrwert deutlich kleiner ist die Bandbreite.

Bei einer weiteren Ausführungsform ist im zeitlichen Mittel die Sendeleistung im Rahmen der technischen Auslegung des Senders maximal. Bleibt diese unterhalb der zulässigen Leistung, so wird auf diese Weise das Maximum der
15 technisch möglichen Ausnutzung des dem Sender zur Verfügung stehenden Energiebudgets erreicht.

Bei einem weiteren Ausführungsbeispiel kann die Sendeleistung vorgegeben werden. Die Änderung der Sendeleistungsvorgabe stellt einen externen Eingriff in den Ablauf des erfindungsgemäßen Verfahrens dar. Beispielsweise
20 kann im Rahmen dieses Ausführungsbeispiels einem Nutzer eines mobilen Endgerätes eine Wahlmöglichkeit der Sendeleistungsvorgabe gegeben werden. Damit kann der Nutzer die Sendeleistung entsprechend seinen Wünschen einstellen, etwa um die Abstrahlung des Gerätes in einer stör anfälligen Umgebung so gering wie möglich zu halten. Eine Verringerung der Sendeleis-
25 tungsvorgabe bewirkt dann bei gleichbleibenden Übertragungsbedingungen eine Verringerung der maximal erzielbaren Datenrate, da die Symbole bei der Übertragung zur Erzielung der Sendeenergie mit einer größeren Symboldauer oder mit einer entsprechend geringeren Anzahl an Bits oder beidem gesendet werden.

Nachfolgend werden Ausführungsbeispiele beschrieben, die das Ermitteln der erforderlichen Sendeenergie betreffen.

Bei einem weiteren Ausführungsbeispiel ist ein Schritt des Ermitteln eines aktuellen Wertes der Empfangsenergie bei gegebener Sendeenergie vorgesehen. Beispielsweise kann auf Seiten des Empfängers eine RSSI-Messung (radio signal strength indicator) der empfangenen Leistung durchgeführt und dem Sender ein vom Messergebnis abhängiges Signal rückübertragen werden.

Alternativ oder zusätzlich kann ein Schritt des Ermitteln eines aktuellen Wertes der Fehl-Erkennungsrate beim Sender oder Empfänger vorgesehen sein. Dabei kann die Fehlerrate durch Bestimmung der Anzahl der Fehler innerhalb eines empfangenen Datenrahmens ermittelt werden. Alternativ kann die Fehl-Erkennungsrate durch Mittelung der Fehleranzahl in einer Mehrzahl von Datenrahmen ermittelt werden. Weiterhin kann die Fehl-Erkennungsrate mit Hilfe der Anzahl negativer Quittungssignale des Empfängers über eine vorgegebene Zeitspanne ermittelt werden. Die Fehl-Erkennungsrate ist beispielsweise eine Bitfehlerrate (BER), eine Blockfehlerrate (BLER) oder eine Rahmenfehlerrate (FER). Darin sind häufig verwendete redundante Codierungen und Wiederholstrategien mit eingeschlossen.

Bei einer weiteren Ausführungsform erfolgt die Anpassung der Symboldauer in Abhängigkeit vom aktuellen Wert der empfängerseitigen Fehl-Erkennungsrate oder von einem aktuellen, empfängerseitigen Betrag der Rauschleistungsdichte.

Bei einem weiteren Ausführungsbeispiel übermittelt der Empfänger dem Sender die aktuelle Fehl-Erkennungsrate oder den aktuellen Betrag der Rauschleistungsdichte. Alternativ oder zusätzlich schätzt der Sender die aktuelle empfängerseitige Fehl-Erkennungsrate oder den aktuellen Betrag der Rauschleistungsdichte.

Bei einem weiteren Ausführungsbeispiel wird die Symboldauer oder die Anzahl der in einem Symbol enthaltenen Bits oder beides in Abhängigkeit von aktuellen Übertragungsbedingungen zwischen Sender und Empfänger dynamisch in einer bestehenden Verbindung oder einem laufenden Datenverkehr nachgeregelt, ohne dass die Verbindung oder der Datenverkehr unterbrochen wird. Das heißt, die Einstellung der Symboldauer erfolgt nicht nur bei Aufbau der Verbindung, sondern auch während der bestehenden Verbindung, und zwar vorzugsweise für den Empfänger transparent. Die Änderung der Symboldauer kann zeitlich kontinuierlich, alternativ quasi-kontinuierlich, alternativ in vorbestimmten Zeitabständen während der Verbindung erfolgen.

Bei einem bevorzugten Ausführungsbeispiel wird die Symboldauer kanalspezifisch, also auf jedem verwendeten Kanal individuell angepasst. Insbesondere können auf diese Weise einem Empfänger, dem Symbole auf mehreren Kanälen übertragen werden, auf jedem Kanal entsprechend den dortigen Übertragungsbedingungen individuell in ihrer Dauer angepasste Symbole gesendet werden.

Die Symboldauer ist in einem Ausführungsbeispiel zu kurzen Symboldauerwerten hin kanalspezifisch allein durch die Bandbreite des Kanals beschränkt. Auf diese Weise steht ein besonders großer Wertebereich zur Variation der Symboldauer zur Verfügung. Die Symboldauer kann aus einem kontinuierlichen Wertespektrum bestimmt werden, alternativ aus einem diskreten Wertespektrum, wobei das diskrete Wertespektrum die ganzzahligen Vielfachen einer kanalspezifisch kürzestmöglichen Symboldauer enthält.

Bei einem bevorzugten Ausführungsbeispiel wird die Symboldauer T_{symbol} senderseitig entsprechend der Formel:

$$T_{symbol} = \frac{E_{\min} \cdot \left(\frac{r}{r_0} \right)^\alpha}{P_{send}}, \quad (1)$$

bestimmt, wobei E_{\min} die Empfangsenergie ist, die dem Empfänger zugeordneten oberen Grenzwert der Fehl-Erkennungsrate entspricht, P_{send} die maximale Sendeleistung, r die Entfernung zwischen Sender und Empfänger, r_0 eine Bezugsentfernung und α ein Ausbreitungskoeffizient.

- 5 Nachfolgend werden Ausführungsbeispiele beschrieben, die die Anpassung der Anzahl pro Symbol übertragener Bits oder die Auswahl eines Symboltyps betreffen.

Bei einer weiteren Ausführungsform der Erfindung erfolgt die Auswahl der Anzahl je Symbol übertragener Bits in Abhängigkeit vom aktuellen Wert der
10 empfängerseitigen Fehl-Erkennungsrate oder von einem aktuellen, empfängerseitigen Betrag der Rauschleistungsdichte.

Vorzugsweise wird die Anzahl je Symbol übertragener Bits kanalspezifisch angepasst. Das kann bedeuten, dass ein Empfänger auf unterschiedlichen Kanälen innerhalb einer Verbindung unterschiedliche Symboltypen empfängt.
15 Auf diese Weise kann die Datenrate auf jedem Kanal individuell optimiert werden.

Bei einer weiteren Ausführungsform erfolgt eine Anpassung der Anzahl je Symbol übertragener Bits dann, wenn eine kanalspezifisch kürzeste Symboldauer bereits verwendet wird. Dies erspart Steuerkommunikation zwischen
20 Sender und Empfänger zur Mitteilung des zu verwendenden Symboltyps so lange wie möglich.

Bei einer weiteren Ausführungsform wird ein Symboltyp mit der höchstmöglichen Anzahl an Bits zur Übertragung ausgewählt, welche empfängerseitig den oberen Grenzwert der Fehl-Erkennungsrate nicht überschreiten lässt.

- 25 Nachfolgend werden Ausführungsbeispiele beschrieben, die verschiedene Übertragungsalternativen betreffen.

- Bei einer weiteren Ausführungsform werden die Symbole jeweils auf eine Sequenz von Chips aufgeteilt übertragen. Dabei können die Symbole in der Frequenz gespreizt werden, indem sie mit einer Noise- (true noise) oder Pseudo-Noise-Sequenz moduliert werden, wobei die Noise- oder Pseudo-Noise-Sequenz dem Empfänger bekannt ist. Vorzugsweise wird die Noise- oder Pseudo-Noise-Sequenz dynamisch der gewählten Symboldauer angepasst. Dies kann beispielsweise erfolgen, indem von einer langen m-Sequenz immer die ersten Chips entnommen werden, so dass diese in Summe die Symboldauer ergeben.
- 10 Alternativ ist es möglich, statt der Pseudo-Noise-Sequenzen CDMA-Sequenzen zu verwenden, so dass parallel mehrere Verbindungen aufgebaut werden können.

- Eine maximale Nutzung der zur Verfügung stehenden Kanaressourcen wird in Bezug auf die Frequenzachse dann erzielt, wenn die Symbole derart übertragen werden, dass die zur Verfügung stehende Kanalbandbreite voll genutzt wird. Vorzugsweise werden die Symbole daher in der Frequenz gespreizt übertragen.
- 15

- Chirpsignale zeigen, dass lange Symbole nicht zwangsläufig eine geringe Bandbreite bedeuten. In einem besonders bevorzugten Ausführungsbeispiel werden die Symbole daher in Form eines Chirpsignals gesendet. Die langen Symbole können in diesem Fall durch Chirpsignale ersetzt werden, die die gleiche Dauer aufweisen. In diesem Fall ist das Produkt aus Zeitdauer und Sendeleistung für beide Pulsformen identisch, d.h. die Energie ist gleich. Die Chirpsignale repräsentieren jedoch eine Frequenzmodulation, die im einfachsten Fall linear verläuft, im allgemeinen jedoch beliebige, vorzugsweise entweder monoton steigende oder monoton fallende Funktionsverläufe annehmen kann, und die sich über die gesamte vorgegebene Bandbreite erstrecken kann. Auf diese Weise werden die Signale in der Frequenz gespreizt.
- 20
25

In einem weiteren Ausführungsbeispiel können sich die für einen jeweiligen Empfänger bestimmten Chirpsignale des Senders zeitlich überlagern. Hierbei ist vorzugsweise die Summe der in einem Zeitpunkt ausgestrahlten Leistungsbeträge der sich überlagernden Chirpsignale gleich der maximal zulässigen Sendeleistung auf dem Kanal.

Durch die angesprochene Spreizung der Signale entsteht ein Spreizgewinn, der für Kanäle hilfreich ist, die unter einer sehr starken Mehrwegeausbreitung und/oder zusätzlichen Störsignalen leiden. In diesem Fall hängt die Qualität des empfangenen Signals in starkem Maße von der gewählten Spreizung des Signals ab. In das Energie-Budget-Management fließt diese Größe direkt ein, weil immer die maximale Bandbreite genutzt werden kann. Mit zunehmender Zeitdauer der Impulse steigen demnach die Spreizung und gleichzeitig die Symbolenergie.

Die in dem gespreizten Symbol enthaltene Energie kann optimal genutzt werden, wenn entsprechende Korrelationsempfänger verwendet werden, z.B. indem ein entsprechendes „matched Filter“ im Empfänger vorhanden ist, das dynamisch angepasst werden muss.

Alternativ ist es bei den langen Symbolen auch möglich, ein FDMA-Verfahren zu überlagern, so dass die vorhandene Bandbreite geteilt wird und der angesprochene Nutzer nur einen kleinen Teil der Bandbreite zugewiesen bekommt, der mit der Länge des jeweiligen Datensymbols korrespondiert. Es könnten dann zwei oder mehrere FDMA-Kanäle parallel betrieben werden.

Dabei ist die Dynamik des Senders von entscheidender Bedeutung, da bei der Aufteilung in FDMA-Kanäle gleichzeitig der oben erläuterte Fall mit schlechten Kanalbedingungen eine geringere Bandbreite zugewiesen bekommt, und daher die optimalen Symbole länger sind und parallel ein Kanal mit guten Bedingungen kürzere Symbole und damit höhere Bandbreite zugewiesen bekommt.

Hier zeigt sich, dass das erfindungsgemäße Energie-Budget-Management mit praktisch jeder Modulationsart und jedem Zugriffsverfahren verknüpft werden kann.

Bei einer weiteren Ausführungsform wird auf einem Kanal, sobald es die Übertragungs-
5 last des Kanals zulässt, ein Multiplexing-Verfahren, vorzugsweise ein TDMA-Verfahren verwendet. Auf diese Weise kann die verbesserte Ausnutzung der Kanalkapazität für einen Kanal gewährleistet werden, der einem Empfänger mit guten Übertragungsbedingungen zugeordnet ist und über den daher in nur kurzer Zeit die zu übertragenden Informationen gesendet werden
10 können. Die optimale Symbolenergie ist für diesen Fall dadurch bestimmt, dass die Fehl-Erkennungsrate für verschiedene Modulationsarten betrachtet wird, und diejenige Modulationsart ausgewählt wird, mit der gerade noch die erforderliche Qualität der Übertragung sichergestellt ist. Gleichzeitig wird hierdurch diejenige höherstufige Modulation ausgewählt, mit der die Daten mög-
15 lichst schnell übertragen werden können, so dass die angesprochene Kanalkapazität optimal genutzt wird. Die Symboldauer wird dabei nicht verändert, da diese bereits auf den minimalen Wert reduziert ist, der dem Kehrwert der Bandbreite entspricht.

Bei einer bevorzugten Ausführungsform ist der Sender ein mobiles Endgerät
20 eines Nutzers und erhält der Sender vor der Übertragung der Symbole zu einer Basisstation von der Basisstation Information über ein für die Übertragung zu nutzendes Frequenzband.

Bei einer weiteren Ausführungsform prüft die Basisstation eingehende Signale des mobilen Endgerätes mit einer Mehrzahl Modulationsarten und verwendet
25 eine als zutreffend erkannte Modulationsart für den Empfang der Signale des mobilen Endgerätes. Beispielsweise empfängt die Basisstation Signale mit Hilfe mehrerer Empfänger, wobei jedem Empfänger eine Modulationsart zugeordnet ist, und das mobile Endgerät eine der senderseitig zur Verfügung stehenden Modulationsarten zur Übertragung von Symbolen zur Basisstation
30 verwendet.

Gemäß einem weiteren Aspekt wird ein Sender zur Durchführung des erfindungsgemäßen Verfahrens bereitgestellt.

Ein Sender zur Durchführung eines Verfahrens hat eine Sendeeinheit, die ausgebildet ist, logische Symbole repräsentierende Signale (in diesem Absatz
5 nachfolgend als Symbole bezeichnet) zu erzeugen und auszusenden, wobei ein logisches Symbol entweder ein Bit oder mehrere Bits repräsentiert. Weiterhin hat der Sender eine Steuereinheit, die ausgebildet ist, anhand von vorliegenden Informationen über aktuelle Übertragungsbedingungen zwischen dem Sender und einem Empfänger der Symbole Steuersignale zu erzeugen
10 und abzugeben, die der Sendeeinheit eine empfängerspezifische Sendeenergie vorschreiben, welche einem dem Empfänger zugeordneten oberen Grenzwert einer Fehl-Erkennungsrate oder einem geringeren Wert als dem Grenzwert der Fehl-Erkennungsrate entspricht, wobei die Steuereinheit zusätzlich ausgebildet ist, zur Erzielung der empfängerspezifischen Sendeenergie
15 und gleichzeitig einer möglichst hohen Bitrate in Abhängigkeit von den aktuellen Übertragungsbedingungen zwischen Sender und Empfänger Steuersignale zu erzeugen und abzugeben, die der Sendeeinheit die Verwendung von Symbolen mit entsprechend angepasster Symboldauer, oder mit entsprechend angepasster Anzahl je Symbol übertragener Bits, oder mit entsprechend angepasster Symboldauer und entsprechend angepasster Anzahl je
20 Symbol übertragener Bits vorschreiben.

Ausführungsbeispiele des erfindungsgemäßen Senders sind in den Ansprüchen 46 bis 77 wiedergegeben. Die Vorteile des erfindungsgemäßen Senders und seiner Ausführungsformen folgen unmittelbar und eindeutig aus der vorstehenden Beschreibung der Verfahrensaspekte der Erfindung und der unterschiedlichen Ausführungsformen des erfindungsgemäßen Verfahrens.
25

Bei besonders bevorzugten Ausführungsbeispielen des erfindungsgemäßen Senders sind aussendbare Signale in einem Speicher abgelegt sind oder aus einer Schieberegisterstruktur ausgelesen werden können.

Alternativ oder zusätzlich ist in einer besonders bevorzugten Ausführungsform die Sendeeinheit des Senders ausgebildet, ein beliebiges auszusendendes Signal durch Ausführung eines oder mehrerer Algorithmen zu erzeugen, die in Form einer entsprechenden Schaltung oder in Form von Software implementiert sind. Die Sendeeinheit erzeugt das jeweils aktuell auszusendende Signal in Abhängigkeit von Steuersignalen der Steuereinheit. Auf diese Weise können beliebige Signalformen, beispielsweise Chirp-Signale oder BPSK-Signalfolgen erzeugt werden.

Vorzugsweise weist die Sendeeinheit einen Signal-Sequenzierer und eine diesem nachgeschaltete IQ-Modulatoreinheit auf. Ein auszusendendes Signal wird nach seiner Erzeugung an den Signal-Sequenzierer und anschließend an die IQ-Modulatoreinheit geleitet und dann direkt ins Trägerband konvertiert.

Weitere bevorzugte Ausführungsformen des erfindungsgemäßen Senders haben eine programmierbare Senderstruktur (Software Radio). Die Senderstruktur, insbesondere die Betriebsmodi des Senders sind vorzugsweise dynamisch veränderbar. Damit kann eine Vielzahl von Sendesymbolen erzeugt werden.

Ein weiteres Ausführungsbeispiel des erfindungsgemäßen Senders hat eine Kanalschätzungseinheit, um die Kanaleigenschaften möglichst exakt zu bestimmen.

Gemäß einem weiteren Aspekt wird ein Empfänger zur Durchführung des erfindungsgemäßen Verfahrens bereitgestellt. Die Merkmale des erfindungsgemäßen Empfängers und seiner bevorzugten Ausführungsformen folgen unmittelbar und eindeutig aus der Beschreibung der Verfahrensaspekte und der dortigen Ausführungsbeispiele.

Vorzugsweise hat der Empfänger eine programmierbare Empfängerstruktur (Software Radio). Die Empfängerstruktur, insbesondere die Betriebsmodi des Empfängers sind in einer Ausführungsform dynamisch veränderbar.

Gemäß einem weiteren Aspekt wird ein Sende- und Empfangssystem zur Durchführung des erfindungsgemäßen Verfahrens bereitgestellt. Die Merkmale der erfindungsgemäßen Sender-Empfänger-Vorrichtung und verschiedene Ausführungsformen sind in den Ansprüchen 78 bis 82 beschrieben. Ihre Vorteile folgen unmittelbar und eindeutig aus der vorstehenden Beschreibung der Verfahrensaspekte und der Beschreibung des erfindungsgemäßen Senders und des erfindungsgemäßen Empfängers.

Nachfolgend wird die Erfindung anhand von Ausführungsbeispielen und unter Bezugnahme auf die Figuren näher erläutert. Es zeigen:

- | | | |
|----|----------|---|
| 10 | Figur 1 | ein Diagramm, das zur Erläuterung des Begriffs „Energie-Budget“ eines Senders anhand der Zusammenhänge zwischen den Größen der spektralen Sendeleistungsdichte, der Übertragungsfrequenz und der Zeit dient. |
| 15 | Figur 2 | ein Diagramm, in dem die Empfangsenergie E_{receive} als Funktion des Abstandes zwischen Sender und Empfänger bei einem Verfahren nach dem Stand der Technik aufgetragen ist. |
| 20 | Figur 3 | ein Diagramm, in dem zur Erläuterung eines Ausführungsbeispiels die Sendeleistung und die Empfangsleistung bei gleichbleibender Empfangsenergie als Funktion der Zeit für unterschiedliche Empfänger dargestellt ist. |
| | Figur 4 | eine schematische Zeichnung eines Wireless-Local-Loop zum Vergleich eines Powermanagement-Verfahrens und des Energie-Budget-Managements. |
| 25 | Figur 5 | eine weitere Darstellung zum Vergleich eines Powermanagement-Verfahrens und des Energie-Budget-Managements. |
| | Figur 6 | eine schematische Darstellung eines Datenrahmens in einem TDMA-Verfahren nach dem Stand der Technik. |
| | Figur 7 | eine schematische Darstellung eines Datenrahmens in einem TDMA-Verfahren mit Energie-Budget-Management. |
| 30 | Figur 8a | komprimierte Symbole mit unterschiedlicher Frequenzspreizung. |

Figur 8b eine Darstellung überlagerter zeitgespreizter Signale.

Figuren 9 bis 13 Blockdiagramme unterschiedlicher Ausführungsbeispiele von Sender-Empfänger-Strukturen.

In Figur 1 ist ein Diagramm dargestellt, dass in einer dreidimensionalen Darstellung Zusammenhänge zwischen den Größen Energiedichte ED, Übertragungsfrequenz f und Zeit t darstellt. An der in der Papierebene liegenden horizontalen Achse (x-Achse) ist die Zeit t aufgetragen, an der in der Papierebene liegenden vertikalen Achse (y-Achse) die Energiedichte ED. An der in der senkrecht zur Papierebene in die Tiefe weisenden Achse (z-Achse) ist die Übertragungsfrequenz f aufgetragen.

Unterhalb der Zeitachse ist die Dauer eines Datenrahmens durch die Länge eines mit T_{FRAME} gekennzeichneten Doppelpfeils zwischen zwei Zeitpunkten t_1 und t_3 dargestellt. Weiterhin sind Symbole 13 bis 16 als Abschnitte eines Quaders EB entlang der Zeitachse dargestellt. Die Symbole 13 bis 16 weisen unterschiedliche Symbolauern T_{symbol} auf. Für das Symbol 13 ist die Symboldauer T_{symbol} anhand eines Doppelpfeils zwischen den Zeitpunkten t_1 und t_2 dargestellt.

Eine auf einem Kanal verfügbare Bandbreite B zwischen zwei Grenzfrequenzen f_1 und f_2 ist durch die Länge eines parallel zur z-Achse angeordneten Doppelpfeils gekennzeichnet.

Während einer Symboldauer T_{symbol} kann auf einer Frequenz f maximal die spektrale Energiedichte:

$$ESD = ED_{\text{max}} \cdot T_{\text{symbol}} \quad (2)$$

übertragen werden. Ihr Wert ergibt sich in der Darstellung der Figur 1 für das Symbol 13 als der Flächeninhalt eines Rechteckes 10, das sich in einer durch die Frequenz bestimmten (ED,t) Ebene über die Zeitspanne T_{symbol} des Symbols 13 und die Energiespanne von 0 bis ED_{max} erstreckt. Die dreidimensiona-

Die Darstellung beinhaltet damit die klassische Definition der spektralen Energiedichte.

Die vom Sender abstrahlbare Leistung P zu einem Zeitpunkt entspricht im Diagramm der Figur 1 einer (ED, f)-Ebene 12 des Quaders EB zu einem gegebenen Zeitpunkt t . Die dreidimensionale Darstellung beinhaltet damit die

5 klassische Definition der momentanen Leistung.

Die dargestellte Energiedichte kann beispielsweise mit einer Wigner-Ville Transformation bestimmt werden.

Die spektrale Energiedichte ist bei gegebener Frequenz f nach oben hin auf einen Wert ESD begrenzt, beispielsweise aufgrund gesetzlicher Vorschriften. Ebenso ist die mittlere oder die maximale Sendeleistung aufgrund gesetzlicher Vorschriften beschränkt, oder aufgrund der technischen Möglichkeiten des Senders, die seine Sendeleistung auf einen Maximalwert limitiert. Die aufgrund einer solchen Begrenzung mögliche Energiedichte ist durch die Länge

10 eines parallel zur y -Achse angeordneten Doppelpfeils symbolisiert.

15

Aufgrund der Frequenzbandbreite B eines Übertragungskanals zwischen einer unteren Grenzfrequenz f_1 und einer oberen Grenzfrequenz f_2 entsteht in der Darstellung der Figur 1 ein Quader EB, dessen Erstreckung entlang der Frequenzachse gleich der Bandbreite B des Übertragungskanals ist.

Der Quader EB kennzeichnet das dem Sender auf einem Kanal der Bandbreite B in der Zeitspanne T_{FRAME} zur Verfügung stehende limitierte Energiebudget des Senders.

20

Fundamental ist in diesem Zusammenhang noch die Relation zwischen Bandbreite und Symboldauer. Dass die maximale Bandbreite durch kurze Symbole ausgeschöpft wird, ist bekannt. Speziell gilt zum Beispiel für rechteckförmige Spektren, dass die Bandbreite durch si -Funktionen voll ausgefüllt wird. Dies

25

folgt aus dem Zusammenhang zwischen si-Funktionen und Rechteckfunktionen über die Fouriertransformation:

$$si\left(\pi \cdot \frac{t}{T}\right) \circ - \bullet T \cdot \text{rect}\left(\frac{\omega}{2\pi/T}\right) \text{Fourier-Transformierte}$$

$$\text{mit } si(x) = \sin(x)/x \quad \text{und} \quad \text{rect}(x) = \begin{cases} 1 & \text{für } |x| \leq 1/2 \\ 0 & \text{für } |x| > 1/2 \end{cases} \quad (3)$$

5 Damit ergibt sich im Basisband die einfache Beziehung zwischen Pulsdauer und Grenzfrequenz:

$$f_g = \frac{1}{2T} \quad (4)$$

wobei die Pulsdauer T den minimalen Abstand zwischen zwei Symbolen bezeichnet, der ohne Intersymbolinterferenzen möglich ist.

10 In aller Regel wird für die Übertragung zusätzlich eine Trägerfrequenz verwendet, so dass die übertragene Bandbreite B dem doppelten Betrag einer Grenzfrequenz f_g im Basisband entspricht ($B=2f_g$).

15 Die in Figur 1 eingezeichneten Quaderabschnitte 13 bis 16 symbolisieren die für die Übertragung des jeweiligen Symbols vom Sender genutzten Anteile des Energie-Budgets während der Rahmendauer T_{FRAME} . Es ist zu erkennen, dass die Symboldauer des zweiten Symbols 14 kleiner ist als die des ersten Symbols 13. Entsprechend ist die Sendeenergie des zweiten Symbols 14 kleiner als die des ersten Symbols 13.

Aus dem Modell der Figur 1 lassen sich die folgenden Erkenntnisse ableiten:

a) Die einem Netzbetreiber zur Disposition stehenden Kanalressourcen sind beispielsweise Bandbreite, maximale Sendeleistung und Zeit. Der Quader EB der Figur 1 entspricht dem einem Betreiber des Senders auf allen von ihm nutzbaren Frequenzen eines Kanals zur Verfügung stehenden Energiebudget während eines Rahmens. Dies bedeutet jedoch nicht, dass die Rahmendauer T_{FRAME} fest ist. Auch sie kann durch das Energie-Budget-Managements verändert werden.

b) Ein wirtschaftlicher Betrieb eines Senders erfordert die volle Ausnutzung des zur Verfügung stehenden Energiebudgets. Die maximale Sendeleistung und die zur Verfügung stehende Bandbreite sollten über die gesamte Zeitspanne des Sendebetriebs stets genutzt werden, um die zur Verfügung stehenden Ressourcen optimal zu nutzen.

c) Eine flexible Anpassung an veränderliche Übertragungsbedingungen zwischen einem Sender und den ihm zugeordneten aktiven Empfängern wird durch ein Management des dem Sender in einer Zeitspanne zur Verfügung stehenden Energie-Budgets erzielt. Die wesentliche physikalische Größe für die erfolgreiche Informationsübertragung vom Sender zu einem jeweiligen Empfänger ist nicht die Sendeleistung, sondern ein ausreichend hoher Betrag der Bit-bezogenen Empfangsenergie. Ein wesentliches Merkmal der erfindungsgemäßen Verfahren ist daher das Bit-Dauer-Management bei vorgegebener Sendeleistung in Form einer empfängerspezifischen Anpassung der Bit-bezogenen Sendeenergie über eine Variation der Bit-bezogenen Dauer eines Symbols. Diese Erkenntnisse werden nachfolgend näher erläutert.

Zu a) Kanalkapazität und Energie-Budget

Ein zur Verfügung stehender Übertragungskanal kann theoretisch nach Shannon optimal genutzt werden, indem pro Zeiteinheit die Datenmenge:

$$C = B \cdot \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right) \quad [\text{bit/s}] \quad (5)$$

angegeben in Bit pro Sekunde, fehlerfrei übertragen wird. Dabei bezeichnet B die Bandbreite des Kanals, und S/N das Verhältnis zwischen empfangenseitiger Signalleistung und Rauschleistung. Die Rauschleistung ist die Summe aus dem empfangenseitigen thermischen Rauschen sowie von
5 Störungen, die durch menschliche oder industrielle Einflüsse auftreten (human made noise, industrial noise). Die Größe C wird als Kanalkapazität bezeichnet.

Es lassen sich an der oben angegebenen Shannon-Formel (5) für ein wirtschaftliches Kanalmanagement fundamentale Eigenschaften ablesen.

10 Die Kapazität eines Übertragungskanals zwischen einem Sender und einem Empfänger hängt wesentlich ab vom Verhältnis der empfangenen Signalleistung S zur vorhandenen Rauschleistung N im Empfänger, kurz bezeichnet als S/N . Offensichtlich ist damit die Kanalkapazität keine feste Größe, die für eine Zelle oder ein lokales Netzwerk konstant ist, sondern
15 eine dynamische Größe, die je nach Qualität des Übertragungskanals von Empfänger zu Empfänger und im Zeitverlauf starken Veränderungen unterworfen sein kann.

Zu b) Ausnutzung der Kanalkapazität

Die Kanalkapazität nach Shannon gemäß Gleichung (5) ist aufgrund vorgegebener Beschränkungen im Übertragungskanal stets limitiert. In anderen Worten: Die Kanalkapazität zu einem gegebenen Zeitpunkt ist eine begrenzte Ressource und ist das eigentliche wirtschaftliche Gut, dass ein
20 Netzbetreiber durch den Aufbau eines Kommunikationsnetzwerkes erwirbt, sei es eines kabelgebundenen oder eines drahtlosen Kommunikationsnetzwerkes. Die dazu notwendigen Investitionen erfordern es, die
25 angebotene Kanalkapazität optimal zu nutzen, um damit wirtschaftlich arbeiten zu können.

Die volle Ausnutzung der vorhandenen Kapazität eines Übertragungskanals ist nur dann möglich, wenn die vorgegebene Sendeleistung, vorzugsweise die maximal zulässige Sendeleistung auf dem Kanal abgestrahlt wird.

5 Zu c) Energie-Budget-Management

In der obigen Formel von Shannon wird die maximale Datenrate angegeben, die fehlerfrei übertragen werden kann. In der Praxis treten Übertragungsfehler auf. In diesem Zusammenhang ist die Bitfehlerrate (Bit Error Rate, BER) eine fundamentale nachrichtentechnische Größe. Übertragungsfehler müssen durch entsprechende Maßnahmen korrigiert werden. Dies erfolgt beispielsweise, indem senderseitig in den zu übertragenden Datenstrom Redundanz eingefügt wird. Auf diese Weise können Fehler erkannt werden.

Die Bitfehlerrate hängt in entscheidendem Maße von der gewählten Modulation ab. Allgemein lässt sich bei allen Modulationsarten ein Zusammenhang zwischen Bitfehlerrate und dem Verhältnis der übertragenen Symbolenergie E_s zur Rauschleistungsdichte N_0 ableiten.

Es ist daher wesentlich, dass der Sender zur erfolgreichen Übertragung von Information dem Empfänger pro Symbol oder Bit eine auf die Rauschleistungsdichte bezogene Mindestenergie zur Erkennung des Symbols bereit stellt. Die erforderliche Mindestenergie ist abhängig von der aktuellen Rauschleistungsdichte und von der dem Empfänger zugeordneten BER, die ihm beispielsweise aufgrund einer vertraglich vereinbarten Übertragungsqualität bereit gestellt wird. Weiterhin ist die erforderliche Mindestenergie abhängig von der Entfernung zwischen Sender und Empfänger.

Zur Verdeutlichung der aus dem Modell der Figur 1 erfindungsgemäß gezogenen Konsequenzen werden nachfolgend drei Beispielfälle erläutert:

a) Geringe Dämpfung

Betrachtet wird zunächst ein günstiger Fall, bei dem die Dämpfung zwischen Sender und Empfänger relativ klein ist. In diesem Fall steht dem entsprechenden Nutzer eine sehr große Kanalkapazität zur Verfügung. Es werden stets die kürzestmöglichen Symbole gesendet, die bezogen auf die vorhandene Bandbreite realisierbar sind, so dass die Sendeenergie pro Symbol bei gleichzeitiger maximaler Sendeleistung den minimalen Wert annimmt. Optional wird zusätzlich eine der Empfangsqualität entsprechende höherstufige Modulation angewendet, damit die am Empfänger zur Verfügung stehende Energie maximal genutzt wird.

Die optimale Symbolenergie wird für diesen Fall beispielsweise dadurch bestimmt, dass die BER für verschieden Modulationsarten betrachtet wird, und diejenige Modulationsart ausgewählt wird, mit der gerade noch die erforderliche Qualität der Übertragung sichergestellt ist. Gleichzeitig wird hierdurch diejenige höherstufige Modulation ausgewählt, mit der die Daten möglichst schnell übertragen werden können, so dass die angesprochene Kanalkapazität optimal genutzt wird. Die Symboldauer wird dabei nicht mehr verändert, da diese bereits auf den minimalen Wert reduziert ist, der dem Kehrwert der Bandbreite entspricht.

Durch die Bereitstellung dieser hohen Kanalkapazität kann die angeforderte Datenmenge sehr schnell übertragen werden, so dass nachfolgend der physikalische Kanal einem oder mehreren Nutzern durch Anwendung geeigneter Multiplexing-Verfahren zur Verfügung steht. Günstig in diesem Zusammenhang ist beispielsweise ein TDMA-Verfahren, damit sich der entstehende Managementaufwand in Grenzen hält.

b) Hohe Dämpfung

In einem anderen, hier als „worst case“ bezeichneten Fall ist ein Nutzer vorhanden, dessen physikalischer Übertragungskanal eine sehr große

Dämpfung aufweist, sei es durch eine große Entfernung oder durch „Fading“-Löcher, die durch Mehrwegeausbreitungen entstehen. In diesem Fall ist die für den Empfänger verfügbare Kanalkapazität sehr klein und die gesendete Symbolenergie muss sehr groß sein, d.h., es werden sehr lange Symbole ausgesendet.

Die optimale Symbolenergie ist für diesen Fall dadurch bestimmt, dass nur noch die einfachste zur Verfügung stehende Modulation betrachtet wird. Für diese ist die minimale zu empfangende Energie, mit beispielsweise die geforderte BER eingehalten wird, fest vorgegeben, so dass die Symboldauer dynamisch im Sender verändert werden muss, um beim Empfänger immer die teilnehmerbezogene Symbolenergie zu erzeugen.

In diesem Fall sind die Symbole deutlich länger als die durch die Bandbreite vorgegebene kürzeste Symboldauer. Die optimale Nutzung der Kanalkapazität ist daher noch einmal konkreter zu betrachten, da dort neben dem S/N [W/W] auch die Bandbreite des Kanals eingeht.

Ist die Bandbreite des verwendeten Symbols kleiner als die vorgegebene, kann die maximale Kanalkapazität nicht genutzt werden und es müssen weitere zusätzliche Maßnahmen ergriffen werden. Solche Maßnahmen werden nun erläutert:

Lange Symbole bedeuten nicht zwangsläufig geringe Bandbreite, dies zeigen Chirpsignale, wie in der DE 199 37 706 gezeigt wird. Die langen Symbole können in diesem Fall durch Chirpsignale ersetzt werden, die die gleiche Dauer aufweisen. In diesem Fall ist das Produkt aus Zeitdauer und Sendeleistung für beide Pulsformen identisch, d.h. die Energie ist gleich.

Die Chirpsignale bewirken jedoch eine Frequenzmodulation (die im einfachsten Fall linear verläuft, im allgemeinen jedoch beliebige, monoton steigende Funktionsverläufe annehmen kann), die sich über die gesamte vorgegebene Bandbreite erstrecken kann. Auf diese Weise werden die

Signale in der Frequenz gespreizt. Dieser Fall wird weiter unten noch ausführlicher betrachtet.

Außerdem ist es möglich, die Symbole in der Frequenz zu spreizen, indem sie mit einer Pseudo-Noise-Sequenz zusätzlich moduliert werden.
5 Diese Modulation muss natürlich dem Empfänger bekannt sein und ebenfalls dynamisch der gewählten Symboldauer angepasst werden.

In einer speziellen Variante des Energie-Budget-Managements kann eine lange Pseudo-Noise-Sequenz, beispielsweise eine m-Sequenz, vorgegeben werden, deren Chipdauer die gegebene Bandbreite widerspiegelt.
10 Bei maximaler Bandbreite sind dann die verschiedenen Symboldauern in diskreten Stufen (ganzzahligen Vielfachen der Chips) realisierbar, indem von der vorgegebenen Sequenz immer ein Teilstück verwendet wird.

Die in dem gespreizten Symbol enthaltene Energie kann nur dann optimal genutzt werden, wenn entsprechende Korrelationsempfänger verwendet werden, z.B. indem ein entsprechendes „matched Filter“ im Empfänger
15 vorhanden ist, dass dynamisch angepasst werden muss.

Alternativ ist es bei den langen Symbolen auch möglich, ein FDMA zu überlagern, so dass die vorhandene Bandbreite geteilt wird und der angesprochene Nutzer nur einen kleinen Teil der Bandbreite zugewiesen bekommt, der mit der Länge des jeweiligen Datensymbols korrespondiert. Es
20 könnten dann zwei oder mehr FDMA-Kanäle parallel betrieben werden.

In einer speziellen Ausführung kann ein Uplink- und ein Downlink-Kanal als Frequency-Division-Duplex (FDD) realisiert werden, die zeitlich parallel betrieben werden.

25 Dabei ist die bereits erläuterte Dynamik des Senders von entscheidender Bedeutung. In dem angesprochenen FDMA könnten nun beispielsweise zwei Kanäle parallel betrieben werden, wobei einer dem ersten Fall mit

hoher empfangener Energie entspricht und der zweite dem betrachteten „worst case“. Die optimalen Symbole unterscheiden sich daher erheblich in den beiden Kanälen.

c) Gestörte Kanäle

5 Als abschließendes Beispiel werden Kanäle betrachtet, die unter einer sehr starken Mehrwegeausbreitung und/oder zusätzlichen Störsignalen leiden. In diesem Fall hängt die Qualität des empfangenen Signals in entscheidendem Maße von der gewählten Spreizung des Signals ab. In das Energie-Budget-Management fließt diese Größe direkt ein, da immer die
10 maximale Bandbreite genutzt werden kann, so dass mit zunehmender Zeitdauer der Impulse die Spreizung und gleichzeitig die Symbolenergie steigt.

Entscheidend für die optimale Nutzung der Kanalressource ist nicht, dass auch der „worst case“ eingehalten wird, sondern dass im „best case“ die ma-
15 ximal mögliche Datenrate übertragen wird und damit die Eigenschaften des Kanals optimal genutzt werden können. Damit ist es möglich, die Kanalkapazität des Netzes deutlich zu steigern, wie weiter unten näher erläutert wird.

Die vorstehenden Beispiele zeigen: Das Energie-Budget-Management geht vorzugsweise einher mit einer mehrdimensionalen Optimierung aller physikali-
20 schen Größen, die die Kanalressourcen definieren, die Zeitachse, die Frequenzachse und die maximale Sendeleistung.

Eine typische nachrichtentechnische Anwendung und ihre Umsetzung gemäß dem Stand der Technik wird nachfolgend anhand von Figur 2 etwas detaillierter beschrieben, um die physikalischen Randbedingungen im Übertragungs-
25 kanal zu veranschaulichen und die erfindungsgemäßen Konsequenzen zu erläutern.

In drahtlosen Übertragungsverfahren tritt der Fall auf, dass die empfangene Energie pro Symbol für Freiraumausbreitung annähernd quadratisch mit der Entfernung abnimmt. Als vereinfachende Annahme wird in diesem Beispiel vorausgesetzt, dass nur eine Modulationsart verwendet wird und keine höher-
 5 stufigen Modulationen verwendet werden. Des Weiteren wird angenommen, dass die Symbole immer mit der gleichen Dauer T_{ref} und der gleichen Sendeleistung P_{send} für jeden Teilnehmer abgestrahlt werden.

Figur 2 zeigt nun ein Diagramm, in dem die Empfangsenergie E_{receive} als Funktion des Abstandes r zwischen einem Sender und Empfänger eines drahtlosen
 10 Datenübertragungsnetzwerkes aufgetragen ist. Auf der Abszisse ist der Abstand r aufgetragen, auf der Ordinate die Empfangsenergie E_{receive} . Die funktionelle Abhängigkeit zwischen der Empfangsenergie und dem Abstand r zwischen Sender und Empfänger ist :

$$E_{\text{receive}} \sim \frac{1}{r^2} \quad (6)$$

15

Diese Beziehung ist im Diagramm der Figur 2 durch eine Kurve 20 wiedergegeben.

Parallel zur Abszisse ist eine Rauschleistungsdichte in Form einer gestrichelten Linie 22 eingezeichnet. Parallel zur Abszisse ist ebenfalls eine durchgezogene Linie 24 eingezeichnet, die den Betrag der für die Erzielung einer emp-
 20 fängerspezifischen Bitfehlerrate BER erforderliche Mindestsymbolenergie E_{min} kennzeichnet, die durch die verwendete Modulationsart vorgegeben ist. Die konstante Symboldauer T_{ref} ist als Breite eines Balkens 26 parallel zu einer zweiten horizontalen Achse 27, einer Zeitachse, dargestellt.

25 In diesem einfachen Modellsystem nach dem Stand der Technik gibt es genau eine Entfernung r_{ref} zwischen Sender und Empfänger, bei der die Empfangsenergie E_{receive} genau dem zur Erkennung erforderlichen Mindestwert E_{min} ent-

spricht. Ein Balken 29 zeigt die minimale Empfangsenergie E_{\min} , die beim Abstand r_{ref} zwischen Sender und Empfänger innerhalb der Zelle noch zum korrekten Empfang führt.

5 Wird das Netzwerk nun anhand dieses „worst case“ dimensioniert, d.h. bezogen auf die Sendeleistung und das Linkbudget eine maximale Symboldauer bestimmt, die multipliziert mit der maximalen Sendeleistung die maximale Sendeenergie ergibt, so ist bei allen näher liegenden Nutzern die empfangene Energie und damit die Symboldauer zu groß. Empfänger, die in geringerem Abstand zum Sender angeordnet sind als r_{ref} , erhalten mehr Energie als erforderlich. Empfänger, die in größerer Entfernung zum Sender sind als r_{ref} , empfangen eine Energie, die zur Erkennung von Symbolen mit der vorgegebenen BER nicht ausreicht.

15 Aus Sicht des Senders ist für $r < r_{\text{ref}}$ der Empfangsenergiebereich 28 zwischen der Geraden 24 (E_{\min}) und der abstandsabhängigen Kurve 20 überschüssige, verschwendete Energie. Denn diese Energie wird empfängerseitig zur Erkennung mit der vorgegebenen BER nicht benötigt. Andererseits ist im Abstandsbereich $r > r_{\text{ref}}$ der Empfangsenergiebereich 30 zwischen der Geraden E_{\min} und der abstandsabhängigen Kurve 20 fehlende Energie zur empfängerseitigen Erkennung mit der vorgegebenen BER bei der gegebenen Rauschleistungsdichte.

Durch ein Powermanagement-Verfahren gemäß dem Stand der Technik könnte nun für die näher liegenden Empfänger die Sendeleistung herunterge-regelt werden. Doch dies bedeutet, dass die Kanalressource Sendeleistung nicht voll genutzt wird.

25 In einem Ausführungsbeispiel des Energie-Budget-Managements (EBM) wird die Symboldauer bei maximaler Sendeleistung variiert und damit die Energie des gesendeten Symbols den Erfordernissen des Kanals angepasst, ohne die Sendeleistung zu reduzieren. Das Energie-Budget wird somit aufgeteilt, indem jedem Teilnehmer bei voller Sendeleistung jeweils teilnehmerspezifische

Symbol dauern und damit Energie-Pakete zugesendet werden. Für jeden Nutzer wird auf diese Weise die optimale Symboldauer in Abhängigkeit von der empfangenen Leistung so berechnet, dass nur diejenige Symbol-Energie im Sender aufgebracht wird, die zum Empfang mit einer dem Empfänger vorgegebenen Fehl-Erkennungsrate (Error rate) erforderlich ist. In Figur 2 ist dies durch E_{\min} gekennzeichnet. Die dadurch eingesparte Sendeenergie nutzt der Sender gemäß dem Energie-Budget-Management beispielsweise im Rahmen eines TDMA-Verfahrens zur Anpassung der Symbolenergie für solche Empfänger, die aktuell schlechtere Empfangsbedingungen haben, oder zur Bedienung weiterer Übertragungen zu Empfängern im Nahbereich. Auf diese Weise kann die Reichweite des Senders durch das Management des Energiebudgets erhöht werden.

Auf der einen Seite werden damit Ressourcen besser genutzt, die auf der anderen zusätzlich zur Verfügung stehen, um Teilnehmer zu versorgen, die bei Verfahren nach dem Stand der Technik knapp außerhalb der Zelle lägen und von der Basisstation nicht mehr erreicht werden könnten.

Die Variation der Symboldauer ist nach unten beschränkt. Die kürzeste Symboldauer entspricht der maximalen Bandbreite, die als zusätzliche Größe den Übertragungskanal beschränkt.

Figur 3 zeigt die Konsequenzen des erfindungsgemäßen Verfahrens in einem Balken-Diagramm, in dem die Sende- und Empfangsleistung über einer Zeitachse für verschiedene Beispiele aufgetragen sind. Im Vordergrund ist die jeweilige Empfangsenergie dargestellt, beispielsweise durch die zum Betrachter weisende Frontfläche 42 eines Quaders 44 mit einer durch seine Höhe längs der y-Achse bestimmten Empfangsleistung und einer durch seine Breite längs der x-Achse bestimmten Symboldauer. Im Hintergrund ist die dem jeweiligen Balken der Empfangsleistung korrespondierende Sendeenergie dargestellt, beispielsweise als Frontfläche 46 eines schraffierten Balken 48. Die einander zugehörigen Sendeleistungs- und Empfangsleistungsbalken weisen natürlich dieselbe Symboldauer auf, dargestellt als gleiche Erstreckung längs

der Zeitachse. Die Balken unterscheiden sich jedoch in der Höherenstreckung: die Empfangsleistung ist stets geringer als die zugehörige Sendeleistung.

Die entlang der Zeitachse nebeneinander dargestellten unterschiedlichen Balken entsprechen beispielsweise verschiedenen Empfängern mit in Richtung der Zeitachse zunehmendem Abstand vom Sender oder Empfängern mit unterschiedlicher zugeteilter Datenrate. Es wird eine allen dargestellten Beispielen gemeinsame, allein abstandsabhängige Dämpfung angenommen. Als weitere Randbedingung soll allen Empfängern dieselbe BER zur Verfügung gestellt werden. Um dies zu ermöglichen muss die Empfangsenergie stets den Betrag E_{\min} erreichen. Alle im Vordergrund angeordneten Quader, die die Empfangsleistung als Funktion der Zeit darstellen, haben demnach in Figur 3 denselben Flächeninhalt der Frontflächen. Hierfür werden Empfängern, die das Symbol mit geringerer Leistung empfangen, also einen größeren Abstand vom Sender haben, die Symbole mit einer entsprechend längeren Symboldauer übermittelt.

Die dritte Koordinate, die Tiefe der Balken, repräsentiert dabei die verwendete Bandbreite, die für den Kanal als zusätzliche Größe vorgegeben ist. Diese ist hier konstant dargestellt, da auch bei variabler Zeitdauer der Symbole immer eine entsprechende Spreizung gefunden werden kann, so dass hierdurch die volle Bandbreite genutzt wird.

Im erfindungsgemäßen Verfahren werden, wie in Figur 3 gezeigt, die gesendeten Datensymbole dynamisch in der Energie angepasst, indem ihre zeitliche Dauer angepasst wird. Dabei wird der Sender hier so betrieben, dass er stets auf einem jeweiligen Kanal das zulässige Maximum der Sendeleistung abstrahlt, wie durch für alle Beispiele der Figur 3 gleiche Sendeleistung gezeigt ist. Die Symbole werden dynamisch in Ihrer Bit-bezogenen Dauer angepasst, um einem betreffenden Empfänger in Abhängigkeit vom aktuellen Zustand des Übertragungskanals gleich bleibende Empfangsqualität, das heißt, gleiche Empfangsenergie E_{\min} zu bieten.

Dabei kann im Sinne der Erfindung bei gleicher Symboldauer zusätzlich eine höhere oder geringere Modulationsstufe gewählt werden, so dass mit einem Symbol eine höhere oder geringere Anzahl Bits übertragen wird. Die gezeichnete minimale Energie ist dabei von der jeweiligen Modulationsart abhängig.

- 5 Ein Ausführungsbeispiel für das oben beschriebene Energie-Budget-Management, soll nun unter weiterer Bezugnahme auf die Figuren 1 bis 3 detaillierter beschrieben werden, dazu werden die wesentlichen Aspekte noch einmal aufgeführt.

10 In drahtlosen Übertragungsverfahren tritt der Fall auf, dass die empfangene Energie pro Symbol für Freiraumausbreitung annähernd quadratisch mit der Entfernung abnimmt. Die minimale Energie, die für den sicheren Empfang der Symbole notwendig ist, hängt dagegen nur von der gewählten Modulation ab und ist daher konstant. Bei vorgegebener maximaler Sendeleistung ist damit der maximale Zellradius durch den Abstand r_{ref} in Figur 2 bestimmt.

- 15 Wird ein Netzwerk anhand dieses „worst case“ dimensioniert, d.h. bezogen auf die Sendeleistung und das Linkbudget eine maximale Symboldauer bestimmt, die multipliziert mit der maximalen Sendeleistung die maximale Sendenergie ergibt, so ist bei allen näher liegenden Nutzern die empfangene Energie und damit die Symboldauer zu groß.

- 20 Bei Verwendung eines Powermanagement könnte in diesem Fall die Sendeleistung heruntergeregelt werden, so dass der Sender einen der Situation angepassten Zustand annimmt. Doch dies bedeutet, dass die Kanalressource Sendeleistung nicht voll genutzt wird. In diesem Fall kann das Energie-Budget-Management vorteilhaft angewendet werden, indem die Symboldauer verkürzt wird. Damit wird eine deutlich höhere Datenrate realisiert und die Kanalbelegungsdauer reduziert. Dies ermöglicht beispielsweise die Durchführung eines TDMA-Verfahrens.
- 25

Für jeden Nutzer wird die optimale Symboldauer berechnet. Bei einem bevorzugten Ausführungsbeispiel wird die Symboldauer T_{symbol} sendersseitig entsprechend der Formel (1) bestimmt.

5 Diese dynamische Steuerung der Symboldauer in Abhängigkeit von der Empfangsqualität ist prinzipiell in jedem System möglich.

Entscheidend ist jedoch die Frage nach der optimalen Nutzung der Bandbreite, da mit der dynamischen Symboldauer in der Regel gleichzeitig auch die Bandbreite des Symbols verändert wird. Zum einen kann die jeweilige Bandbreite dynamisch geregelt werden, indem ein FDMA implementiert wird, bei
10 dem die Bandbreite dynamisch nach den Anforderungen aufgeteilt wird. Die Realisierung eines solchen Verfahrens in Hardware ist sehr aufwendig und kompliziert. In einem "Software-radio" ist eine derartige dynamische Trennung dagegen realisierbar .

Des weiteren ist es möglich, bezogen auf die Bandbreite das kürzeste Symbol
15 zu definieren (Chip), und durch eine Aneinanderreihung mehrerer dieser Chips die Datensymbole zu formen, indem bestimmte Sequenzen die Symbole repräsentieren. Das Energie-Budget-Management wird dann mit einer Frequenzspreizung kombiniert. In diesem Fall ist die dynamische Veränderung der Symboldauer durch die verwendeten Chips quantisiert.

20 Im Besonderen eignen sich jedoch Chirpsignale für diese Anwendung, bei diesen kann zwischen der Frequenzspreizung und einer Zeitspreizung unterschieden werden, siehe DE 199 37 706. Dabei erfolgt die Frequenzspreizung, indem die bezogen auf die Bandbreite kürzesten Impulse erzeugt werden und anschließend diese Impulse in der Zeitspreizung auf eine beliebige Dauer
25 ausgedehnt werden. Diese Ausdehnung der Impulse kann dann dynamisch nach der erforderlichen Energie erfolgen.

Hohe Datenraten werden mit diesem Verfahren erzielt, indem die einzelnen Chirpsignale sich zeitlich gegenseitig überlagern. Die maximale Sendeleis-

tung, die ein Nutzer verwenden kann, wird daher aufgeteilt, so dass jedes Chirpsignal nur einen Bruchteil erhält, je nach dem Grad der Überlagerungen.

Dies ist möglich, da die Symbole im Empfänger auf kurze Impulse komprimiert werden, deren Maximum in den Nullstellen der anderen Impulse liegt. Diese
5 si-förmigen Impulse spiegeln natürlich die verwendete Bandbreite wider.

Auch hier kann eine quantisierte Erhöhung der Symbolenergie erfolgen, indem immer weniger Symbole sich wechselseitig überlagern und damit die Leistung des einzelnen Symbols schrittweise erhöht wird, solange, bis keine Überlap-
pung der Symbole mehr erfolgt. Die Folge hiervon ist, dass die komprimierten
10 Impulse einen immer größeren Abstand zueinander aufweisen und mehrere Nullstellen leer bleiben.

Die dynamische Zuweisung der Symboldauer ist nach unten beschränkt durch die Bandbreite. Damit wird der kürzeste Impuls vorgegeben, der in der Modu-
lation verwendet werden kann. Auf der anderen Seite besteht jedoch keine
15 Beschränkung, d.h. die Symbole können auch extrem lang sein.

Dies soll unter nochmaliger Bezugnahme auf Figur 2 erläutert werden. Die heute üblichen Zellgrößen sind durch den Punkt r_{ref} beschrieben, bei dem die Signale gerade noch empfangen werden können. Jenseits dieses Punktes ist in den klassischen Systemen kein Empfang mehr möglich. Für einen Nutzer,
20 der nur wenig außerhalb der Zelle liegt, ist damit eine neue Zelle einzurichten. Dies kann speziell bei Wireless Local Loop (WLL)-Anordnungen sehr hohe Kosten verursachen.

Mit Hilfe des hier beschriebenen Energie-Budget-Managements durch eine Energiemodulation ist es möglich, auch diesen Nutzer noch von der gleichen
25 Basisstation aus zu versorgen, indem die Symbole noch länger werden und damit mehr Energie tragen. Auf diese Weise erfolgt eine dynamische Ausdehnung der Zelle in einzelne Richtungen, an denen sich Nutzer befinden. Dies ist

eine Besonderheit, die sich in anderen Kanalmanagement-Verfahren nicht findet.

Die Erzeugung langer Symbole in einem Sender bereitet oft keine Schwierigkeiten. Im Empfänger dagegen kann es große Probleme bereiten, lange Symbole mit geringer Bandbreite zu empfangen, insbesondere wenn ein FDMA
5 verwendet wird und die Frequenz genau getroffen werden muss.

In der Regel ist es hier günstiger, die Symbole zu spreizen und einen Korrelationsempfänger zu verwenden. Dies gilt gleichermaßen für CDMA Sequenzen wie auch für Chirpsignale.

10 Auch diese Empfängertypen entsprechen im Grunde dem klassischen „Matched Filter“, das zur optimalen Übertragung verwendet wird.

Aufgrund der dynamischen Energiemodulation und damit Symboldauer-Variation muss dieses Filter ebenfalls dynamisch angepasst werden. In einer Realisierung als „Software radio“ ist auch dieses möglich.

15 Wesentlich für die Anwendung der Energiemodulation ist noch die Unterscheidung von Basisstationen und Subscribern. Beschränkt sind für den Nachrichtenkanal in der Regel die Bandbreite und die Leistung. Für den Subscriber ist es daher möglich, die Datensymbole mit voller Leistung auszusenden und mit der entsprechenden Energiemodulation die optimale Symbol-
20 länge zu erzeugen. Das hierfür notwendige Frequenzband muss vorher von der Basisstation freigegeben werden, so dass sich die Nutzer untereinander nicht stören.

Im umgekehrten Fall ist dies nicht so leicht möglich, da die Aufspaltung des Kanals in einzelne Frequenzbänder gleichzeitig auch eine Aufteilung der maximalen Sendeleistung bedeutet, da die Summe aller Sendeleistungen über
25 der Frequenz die maximal zulässige Leistung nicht überschreiten darf. Aufgrund der bekannten eindeutigen Verknüpfungen zwischen Sendeleistung,

Symboldauer und Bandbreite ist es möglich, die optimale Energiemodulation dynamisch in jedem Netzwerk zu berechnen und so eine maximale Kanalkapazität in einem Netzwerk zu realisieren.

- Nachfolgend wird die Bestimmung der Stellgrößen erläutert. Das Energie-
- 5 Budget-Management basiert - wie oben näher erläutert - darauf, dass empfangerspezifisch die Sendeenergie angepasst wird, beispielsweise bei einer Basisstation oder einem Access-Point. Dementsprechend wird beispielsweise bei guten Übertragungsverhältnissen eine höherstufige Modulation, bei schlechten eine Erhöhung der Symboldauer vorgenommen.
- 10 Damit dieses Verfahren automatisch gesteuert werden kann, müssen die notwendigen Regelgrößen ermittelt und zwischen Sender und Empfänger eine effiziente Modulation vereinbart werden. Dazu gibt es prinzipiell verschiedene Wege. Alle heute üblichen Verfahren des Powermanagements können für das Energie-Budget-Management übernommen werden, da bei diesen die Leis-
- 15 tung am Empfänger ermittelt wird und damit die empfangene Energie für das entsprechende Symbol bekannt ist und daraus eine Extrapolation für alle anderen verfügbaren Symbole möglich ist. Zwei Prinzipien werden hier exemplarisch aufgeführt.

- Durch eine einfache RSSI-Messung (radio signal strength indicator) im Empfänger kann die empfangene Leistung direkt gemessen werden. Damit ist die
- 20 Empfangsqualität bekannt und es kann zwischen Basisstation und Subscriber die optimale Modulation und/oder Symboldauer und/oder Spreizung abgestimmt werden. In der Regel sind dabei die Werte von Basisstation und Subscriber unterschiedlich, da an den verschiedenen Orten unterschiedliche Stö-
- 25 rungen auftreten können.

Zweitens kann die Qualität der Übertragung auch durch eine Messung der Fehler innerhalb eines Rahmens bestimmt werden, wenn z.B. ein Fehlererkennender-Code angewendet wird. Die Modulation und/oder Symboldauer

und/oder Spreizung kann dann schrittweise verändert werden, bis die optimale Übertragungseffizienz erreicht ist.

Die Regelung kann in einer bestehenden Verbindung oder einem laufenden Datenverkehr kontinuierlich nachgeregelt werden, ohne dass die Übertragung
5 abreist.

Schwieriger ist es dagegen, in einem zellularen Netzwerk eine Verbindung aufzubauen. Hier sendet ein Teilnehmer im Access-Kanal eine Anfrage zur Basisstation. Diese kann ggf. von der Basisstation nicht empfangen werden, da die verwendete Modulation nicht bekannt ist.

10 Auch hier gibt es verschiedene Lösungen. Zunächst ist es immer möglich die physikalisch robusteste Verbindung zu verwenden, die bei einem richtig dimensionierten Netz immer funktionieren muss. Damit ist aber eine Vergeudung von Ressourcen verbunden.

Eine weitere Möglichkeit ist es, in der Basisstation mehrere Empfänger aufzu-
15 bauen, so dass im Access-Kanal verschiedene Modulationsarten zugelassen sind, und der jeweilige Subscriber mit der zuletzt verwendeten Modulation die Übertragung startet. Im parallelen Empfang ist dann immer einer auf die gesendete Modulation abgestimmt.

Allgemein ist auch eine wiederholte Abfrage des Access-Kanals möglich, wo-
20 bei die denkbaren Modulationsarten und/oder Symbolauern und/oder Spreizungen systematisch geprüft werden. Hier sind effiziente Algorithmen denkbar, wie Sie heute schon in Systemen angewendet werden, die verschiedene Trägerfrequenzen zur Datenkommunikation nutzen.

Die gleiche Problematik tritt bei CDMA-Systemen auf, bei denen jedem Nutzer
25 ein spezieller Spreizcode dynamisch zugewiesen werden muss, bevor die eigentliche Verbindung (Verkehrskanal) bereit steht.

Ebenso ist es im Energie-Budget-Management möglich, die optimalen Symbole zu bestimmen, die für die Übertragung verwendet werden sollen, bevor diese im eigentlichen Verkehrskanal angewendet werden.

5 Dabei ist es auch möglich, dass sich die gesendeten von den empfangenen Symbolen unterscheiden, da die Verluste und Störungen in dem Kanal zwischen Up- und Downlink unterschiedlich sein können.

Figur 4a) zeigt in einer schematischen Darstellung ein Wireless-Local-Loop Netzwerk 50 mit einer Basisstation BS. Teilnehmerstationen sind als SU1 bis SU5 sowie SUn bezeichnet (engl. SU= Subscriber Unit). Weiterhin sind Ausbreitungshindernisse für die Strahlung des Senders mit den Bezugszeichen 52 bis 58 gekennzeichnet. Bei den Ausbreitungshindernissen 52 bis 56 handelt es sich beispielsweise um hohe Gebäude, bei Hindernis 58 um ein Gebirge wie beispielsweise die Alpen.

15 Im Vergleich zu den vorhergehenden Beispielen hängt die Sendeenergie hier nicht mehr ausschließlich von der Entfernung ab, sondern von weiteren Faktoren. Im allgemeinen Fall ist die erforderliche Sendeenergie durch folgende wichtige Parameter bestimmt. Weitere, weniger wichtige, dem Fachmann aber bekannte Parameter, sind in der nachfolgenden Liste nicht aufgeführt:

- > Modulationsart
- 20 > Entfernung von Sender und Empfänger
- > Störungen und Rauschen
- > geforderte BER (z.B. für spezielle Sicherheitsanwendungen)
- > Mehrwegeausbreitung (line-of-sight, non- line-of-sight)
- > Antennencharakteristik

- Die Zellgröße ist entsprechend vorbekannten Verfahren durch die maximale (zulässige) Sendeleistung der Basisstation (BS) vorgegeben. Sie ist in Figur 4 durch eine Kreislinie 60 symbolisiert. Innerhalb dieser Zelle sind die einzelnen Teilnehmer mal näher (so SU5) mal weiter (so SU4) von der Basisstation BS entfernt, zusätzlich treten Signalverzerrungen durch Mehrwegeausbreitung, sowie Abschattung des Signals durch große Gebäude 52 bis 58, auf. Das Gebirge 58 stellt ein unüberwindliches Hindernis dar, so dass Teilnehmer SU3, der sich aus Sicht der Basisstation BS jenseits des Gebirges aufhält, nicht erreichbar ist.
- 10 Aufgrund der Vielfalt der vorhandenen Übertragungskanäle können einzelne Teilnehmer gut, andere schlecht und manche gar nicht erreicht werden. Figur 4b) zeigt in Form eines Balkendiagramms die bei entsprechend vorbekannten Verfahren mit konstanter Symboldauer erforderlichen Sendeleistungen, die zur Übertragung an die jeweiligen SU erforderlich sind. Die Nummerierung der
- 15 Balken entspricht der der Teilnehmer. Beispielsweise symbolisiert Balken 1 die dem Teilnehmer SU1 zugeordnete Sendeleistung. Die beiden SU1 und SU2 liegen außerhalb der Reichweite der Basisstation BS und können nur mit Leistungen erreicht werden, die höher als die zulässige Spitzenleistung P_{send} sind.
- 20 Figur 4c) zeigt dagegen zum Vergleich die mit einem Bit-Dauer-Management erzielte Lösung. Zum Empfang mit derselben Empfangsenergie bei den Teilnehmern wird jeweils eine entsprechend angepasste Sendeenergie verwendet, die durch Anpassung der Symboldauer bei jeweils maximaler Sendeleistung P_{send} eingestellt wird. Aufgrund der verschiedenen Kanaleigenschaften
- 25 unterscheidet sich die vorhandene Kanalkapazität innerhalb des Netzwerkes für jeden Teilnehmer. Diese fundamentale physikalische Eigenschaft begründet einen wesentlichen Unterschied zu heute üblichen Netzwerkorganisationsverfahren, die allen Teilnehmern einer Zelle die gleiche Kanalkapazität (bzw. Datenrate) zuweisen wollen.

Die Aufgabe der Nachrichtentechnik könnte nun neu gefasst werden, indem einem beliebigen Teilnehmer innerhalb eines Netzes dynamisch die optimale Datenrate, bei der jeweils zulässigen Fehlerrate, angeboten werden kann. Die hierfür notwendige Symbolenergie ist damit die bestimmende Regelgröße des Netzwerkes. Aus diesem Ansatz folgt, dass die gesendeten Symbole nicht starr sein dürfen, sie müssen dynamisch beim Sender verändert werden, so dass der betreffende Teilnehmer für die gewählte Modulation in Abhängigkeit von dem Übertragungskanal immer die geforderte Empfangsqualität, beschrieben z.B. durch eine Fehl-Erkennungsrate oder speziell eine Bitfehlerrate, erhält.

Die physikalischen Grundsätze ermöglichen dies in einem dynamischen Kanal aber nur dann, wenn die gesendeten Datensymbole dynamisch in der Energie angepasst werden, d.h. eine optimale Energiemodulation bzw. ein optimales Bit-Dauer-Management erfolgt, oder im Hinblick auf die Netzwerkorganisation: ein Energie-Budget-Management.

Unter Bezugnahme auf Figur 5 soll nun ein allgemeines Ausführungsbeispiel betrachtet werden, das für drahtlose Verbindungen typisch ist. Von einer Basisstation ausgehend wird eine Anzahl N_{channel} Teilnehmer gleichzeitig versorgt, wobei eines der typischen Multiple-Access Verfahren angewendet werden kann. Die folgenden Berechnungen gehen von einer vorgegebenen Zelle aus, die so dimensioniert ist, dass der am weitesten entfernte Nutzer mit einem Abstand r_{ref} [m] vom Sender mit einer vorgegebenen Symboldauer T_{ref} [s] und der maximalen Sendeleistung P_{send} [W], gerade noch die Energie E_{min} [Ws] erhält, die zum sicheren Empfang der Daten notwendig ist.

Des weiteren wird angenommen, dass im allgemeinen Fall die Daten mit einer Spreizung übertragen werden. In diesem Fall gilt somit, dass die verwendete Bandbreite B [Hz] größer ist als der Kehrwert der Symboldauer T_{ref} [s].

Zusätzlich wird angenommen, dass in der Referenzzelle die gewählte Modulationsart für alle Teilnehmer gleich ist, Antennen mit einer isotropen Richtcha-

rakteristik verwendet werden und die Ausbreitung der elektromagnetischen Wellen im Freiraum erfolgt. All diese Annahmen sind keineswegs zwingende Voraussetzungen für das Energie-Budget-Management. Sie dienen lediglich dazu, die hier erläuterten Berechnungen mit einfachen Formeln durchführen zu können.

Die betrachtete Referenzzelle wird von einer Basisstation aus versorgt, die eine fest vorgegebene Anzahl von Kanälen bereitstellt, zum Beispiel in einem TDMA oder CSMA Vielfachzugriffs-Verfahren. Jeder dieser Kanäle verfügt über eine Datenrate R_{ref} [Bit/s], die genau der vom Teilnehmer angeforderten Datenrate entsprechen soll.

Soweit in den nachfolgenden Erläuterungen auf Formeln Bezug genommen wird, die hier nicht angegeben sind, finden sich diese unter der jeweils angegebenen Nummer im Anhang 2.

Die begrenzenden physikalischen Größen in der betrachteten Zelle sind, die Bandbreite und die maximale Sendeleistung. Von grundlegender Bedeutung ist nun, dass für die angenommene Freiraumausbreitung die empfangene Leistung für jeden Teilnehmer in der Zelle quadratisch von dessen Entfernung zur Basisstation abhängt.

Die empfangene Leistung ist die entscheidende Stellgröße in diesem Beispiel, sie ist durch die Position des jeweiligen Nutzers eindeutig bestimmt. Für den Empfang einer gesendeten Information ist jedoch nicht die Leistung entscheidend, sondern die Empfangsenergie pro Bit $E_{receive}$, die sich aus dem Produkt von empfangener Leistung und Symboldauer berechnet. In einem optimalen System sollte diese Größe daher konstant gehalten werden, so dass die erforderliche Fehlerrate eingehalten wird.

$$E_{receive} = P_{receive} \cdot T_{symbol} \quad , \quad P_{receive}(r) \sim \frac{1}{r^2} \Rightarrow T_{symbol} \sim r^2 \quad (7)$$

Das betreffende Referenzsystem sei ein starres System, mit einer festen Symboldauer T_{ref} [s], dessen Dimensionierung darauf ausgelegt ist, bei einer maximalen Entfernung r_{ref} [m] den Empfang der Information sicherzustellen, wodurch die minimale Energie pro Symbol E_{min} vorgegeben ist, die zum Empfang notwendig ist. Dabei wird zunächst angenommen, dass in dem Referenzsystem jedes Symbol nur ein Bit als Informationsgehalt enthält.

$$E_{min} = P_{receive}(r_{ref}) \cdot T_{ref} \quad (8)$$

In vielen heute üblichen Übertragungsverfahren wird die Energie der empfangenen Symbole dadurch konstant gehalten, dass die gesendete Leistung reduziert wird. Auf diese Weise wird die zur Verfügung stehende Kanalressource leichtfertig vergeudet. Es soll hier nun gezeigt werden, wie leicht die Ressourcen durch die Anwendung des Energie-Budget-Management genutzt werden können.

Die folgenden Berechnungen basieren auf dem Vergleich der Systeme, d.h. die Verhältnisse von dem starren Referenzsystem zu dem flexiblen System mit Energie-Budget-Management sind hier entscheidend.

Für den sicheren Empfang der Nachrichten bei der gewählten Modulationsart ist nun die Energie E_{min} [Ws] erforderlich, die über die Kanalverluste mit der gesendeten Energie zusammenhängt.

Diese fällt in erster Näherung quadratisch mit der Entfernung r [m] ab, ist aber nach oben (d.h. bei kleinen Abständen) aus physikalischen Gründen stets beschränkt. Allgemein formuliert gilt für die Abstrahlung der Leistung, unter den genannten Voraussetzungen:

$$P_{receive}(r) = \frac{P_{send}}{1 + \left(\frac{4 \cdot \pi \cdot r}{\lambda} \right)^2} \quad (9)$$

Für die Referenzzelle kann dieser Wert leicht zur minimalen Energie E_{\min} [Ws] in Beziehung gesetzt werden, indem mit der Symboldauer multipliziert wird (19). Da sich nun auf der Luftschnittstelle die Dauer des gesendeten Symbols nicht ändert, kann allgemein die empfangene Energie pro Symbol als Funktion
5 von der gesendeten gesehen werden (20).

In den klassischen Verfahren sendet nun die Basisstation der Referenzzelle die Signale zu allen Teilnehmern mit der gleichen Energie, wodurch wie bereits mehrfach erläutert vorhandene Ressourcen zum Teil vergeudet werden, indem nahe an der Basisstation liegenden Nutzern zuviel Leistung bzw. Ener-
10 gie zugesendet wird.

Aufgrund des Multiple-Access-Verfahrens werden „quasi parallel“ mehrere Nutzer versorgt. Die Anzahl der aktiven Nutzer in der Referenzzelle entspricht dabei der Anzahl der Kanäle N_{channel} des Access-Verfahrens.

Die pro Symbol abgestrahlte Energie E_{send} [Ws] wird definiert als Produkt aus
15 maximaler Sendeleistung P_{send} [W] und Symboldauer T_{ref} [s] des Referenzsystems.

In Summe ist es aufgrund gesetzlicher Vorschriften der Basisstation gestattet, die Energie:

$$E_{BS_classical} = N_{\text{channel}} \cdot E_{\text{send}} \quad (10)$$

20 abzustrahlen.

Dieses Energie-Budget steht demnach für die Zelle zur Verfügung. Genau an diesem Punkt setzt das Energie-Budget-Management an. Jedem Teilnehmer wird nur die Sendeenergie zugesendet, die benötigt wird, damit er die Signale mit einer Energie E_{\min} [Ws] empfängt.

Für die allgemeine Ableitung ist die Anzahl der aktiven Nutzer in dem betrachteten Gebiet bei Verwendung des Energie-Budget-Managements entscheidend, die sich allgemein über die Nutzerdichte bezogen auf die Fläche beschreiben lässt. Im folgenden wird diese Dichte als konstant angesetzt (21)
5 und auf die betrachtete Referenzzelle normiert. Da die Dichte konstant ist, ändert sich der Wert nicht über der Fläche, so dass in den Formeln r und φ nur formal als Variablen verwendet werden, die die Position beschreiben.

Durch die Anwendung des Energie-Budget-Management werden nun die Ressourcen optimal genutzt, indem jeder Nutzer unabhängig von seiner Position die minimale Energie pro Symbol empfängt. Da die empfangene Energie
10 konstant ist, muss dementsprechend die gesendete Energie durch das Energie-Budget-Management in Abhängigkeit von der Entfernung verändert werden (22).

Die im statistischen Mittel insgesamt von der Basisstation abgestrahlte Energie ergibt sich nun als Integral über die flächenbezogene Dichte der aktiven
15 Nutzer (23), jeweils multipliziert mit der gesendeten Energie.

Die Integration über eine kreisförmige Fläche A mit dem Radius r_{cell} [m] ergibt die einfache Formulierung (24), die im folgenden verglichen werden soll mit dem bereits dargelegten Wert für die klassische Zelle.

20 Dazu wird zunächst der Fall betrachtet, dass beide Zellen gleich groß sein sollen, d.h. $r_{\text{cell}} = r_{\text{ref}}$, dieser Fall ist mit 64 in Figur 5 gekennzeichnet, und die von der Basisstation abgestrahlte Energie für beide Fälle gleich sein soll.

Unter diesen Voraussetzungen, dem gleichsetzen von (10) und (24) ergibt sich, unter Beachtung der Formel (19) für die minimale Energie, ein direkter
25 Zusammenhang zwischen der Anzahl der aktiven Kanäle in beiden Fällen.

$$N_{channel} = \frac{1}{2} \frac{2 + \left(\frac{4 \cdot \pi \cdot r_{ref}}{\lambda} \right)^2}{1 + \left(\frac{4 \cdot \pi \cdot r_{ref}}{\lambda} \right)^2} \cdot N_{channel_EBM} \quad (11)$$

Für alle in der Praxis relevanten Fälle kann diese Formel noch wesentlich vereinfacht werden durch die Näherung (25). Damit ergibt sich der einfache Zusammenhang, dass durch die Anwendung des Energie-Budget-Management die Anzahl der Kanäle $N_{channel_EBM}$ gegenüber der herkömmlichen Anzahl $N_{channel}$ bei gleicher Zellgröße und gleicher Datenrate pro Kanal ($R_{EBM} = R_{ref}$) verdoppelt wird.

$$N_{channel_EBM} = 2 \cdot N_{channel} \quad (12)$$

Dies ist in Figur 5 anhand der Zelle 64 dargestellt.

Alternativ kann auch bei gleicher Kanalanzahl $N_{channel_EBM} = N_{channel}$ die Datenrate pro Teilnehmer verdoppelt werden, $R_{EBM} = 2 R_{ref}$. Die Einführung des Energie-Budget-Management führt damit zu einer 100%-igen Steigerung der Effizienz der vorgegebenen Zelle. Dies ist in Figur 5 anhand einer Zelle 62 dargestellt.

Als weiteres Zahlenbeispiel soll anhand einer Zelle 66 der Fall betrachtet werden, dass die Flächendichte der aktiven Nutzer für beide Fälle gleich sein soll (26).

Aufgrund des bereits abgeleiteten Ergebnisses ist damit sofort klar, dass für die betrachtete Zelle unter Anwendung des EBM weniger Energie von der Basisstation ausgesendet wird. Diese Energiedifferenz kann dazu genutzt werden, die Zelle auf $r_{EBM} > r_{ref}$ auszudehnen, in (27) wird dazu r_{cell} durch r_{EBM} ersetzt, dies ist in Figur 5 anhand einer Zelle 66 dargestellt. Die Auflösung der

- Formel (27) führt zu einer komplizierten Formulierung, die als Quotienten nur das Verhältnis von ausgedehnter Zelle zur Referenzzelle enthält (28), die für die maximale Ausdehnung der Zelle unter Anwendung des Energie-Budget-Management bei gleicher Versorgungsqualität aller Teilnehmer gilt. Diese
- 5 Formel lässt sich erneut wesentlich vereinfachen durch Berücksichtigung der Beziehung (25). Es ergibt sich

$$\frac{r_{EBM}}{r_{ref}} = \sqrt[4]{2} \approx 1.2 \quad (13)$$

- Die Zelle 66 wird damit im Radius r_{EBM} um 20% ausgedehnt bei gleicher Versorgungsqualität (Datenrate) aller aktiven Teilnehmer, $R_{EBM} = R_{ref}$. Dies er-
- 10 scheint zunächst wenig, doch erhöht sich damit die Anzahl aller Kanäle von $N_{channel}$ auf

$$N_{channel_EBM} = N_{channel} \cdot \left(\frac{r_{EBM}}{r_{ref}} \right)^2 = N_{channel} \cdot \sqrt{2} \approx 1.41 \cdot N_{channel} \quad (14)$$

Die Anzahl der Kanäle $N_{channel_EBM}$ in der Zelle 66 kann damit um 41% gesteigert werden. Dieser Vorteil ist in Figur 5 graphisch dargestellt.

- 15 Die obige Ableitung soll nun mit Blick auf die technische Umsetzung des EBM noch einmal näher betrachtet werden. Offensichtlich steht einem Teilnehmer, der sich in der Nähe der Basisstation befindet, in der Regel ein Kanal zur Verfügung, der gegenüber dem weiter entfernt liegenden kleinere Kanalverluste aufweist. In der obigen Ableitung zeigt sich nun, dass für den sicheren Empfang
- 20 eines gewählten Symbols damit weniger Energie von der Basisstation abgestrahlt werden muss.

Die Frage ist nun, wie dies technisch umgesetzt werden kann. Dabei gibt es prinzipiell zwei Wege, die Variation der Symboldauer und die Variation der Modulation.

Die folgende Ableitung zeigt, dass beide Verfahren gleichwertig sind, aber anderen Beschränkungen unterliegen, so dass abschließend festgehalten werden kann, dass das beschriebene Energie-Budget-Management prinzipiell durch die dynamische Veränderung der Symboldauer und/oder durch eine
 5 höherstufige Modulation optimal umgesetzt werden kann.

Als bevorzugte Variante wird eine Kombination beider Verfahren vorgeschlagen, bei der die elegante Variation der Symboldauer erfolgt, bis diese durch die beschränkte Bandbreite nicht weitergeführt werden kann, und anschließend die höherstufige Modulation angewendet wird.

10 In jedem Fall stellt die oben abgeleitete Formulierung (24) die Grenze der erzielbaren Verbesserungen des Energie-Budget-Management dar.

Zunächst ermöglicht das EBM eine dynamische Anpassung der Symboldauer. Die gesendete Energie pro Symbol ergibt sich als Produkt der gesendeten Leistung P_{send} [Ws] multipliziert mit der jeweiligen Symboldauer T_{symbol} [s].
 15 Dass eine Variation der Sendeleistung auf einen Wert kleiner als dem maximal erlaubten eine Verschwendung von Kanalressourcen bedeutet, wurde bereits hinreichend erläutert. Daher ist dieser Wert konstant.

Damit sich die gesendeten Energien für die einzelnen Teilnehmer unterscheiden, kann die Symboldauer variiert werden. Für den oben diskutierten Fall gilt
 20 damit:

$$E_{\text{send_EBM}}(r) = \left[1 + \left(\frac{4 \cdot \pi \cdot r}{\lambda} \right)^2 \right] \cdot E_{\text{min}} \Leftrightarrow T_{\text{symbol_EBM}}(r) = \frac{1 + \left(\frac{4 \cdot \pi \cdot r}{\lambda} \right)^2}{1 + \left(\frac{4 \cdot \pi \cdot r_{\text{ref}}}{\lambda} \right)^2} \cdot T_{\text{ref}}$$

(15)

Darin bezeichnet E_{\min} [Ws] die Energie, die am Empfänger mindestens erforderlich ist, um die Symbole sicher zu detektieren und T_{ref} [s] ist die Symboldauer in der zuvor betrachteten Referenzzelle mit klassischer Organisation der Zelle.

- 5 Die dynamische Änderung der Symboldauer ist offensichtlich eine sehr elegante Art, die Symbolenergie dynamisch im Sender zu verändern.

Im allgemeinen ist die zur Übertragung eines Symbols mindestens erforderliche Bandbreite gleich dem Kehrwert der Symboldauer. Dieser erste Ansatz kann daher dazu führen, dass die erforderliche Bandbreite nicht zur Verfügung
10 steht. Damit kann dieser Ansatz leicht an Grenzen stoßen, die eine optimale Nutzung des Energie-Budget-Managements verhindern.

Alternativ oder zusätzlich kann eine dynamische Änderung der höherstufigen Modulation vorgenommen werden. Diese zweite Realisierungsform ist etwas komplizierter und muss daher näher erläutert werden. In den bislang verwen-
15 deten Formulierungen tritt die Größe E_{\min} auf, die für den allgemeinen Fall die Energie bezeichnet, die bei einer gewählten Modulation im Empfänger ankommen muss, damit dieser die Information eines Bit mit hinreichender Sicherheit erkennt. Im allgemeinen Fall kann ein Symbol jedoch mehrere Bit enthalten.

- 20 Der Zusammenhang zwischen Symbolenergie und Bitenergie, bzw. Informationsgehalt des Symbols, ergibt sich aus der gewählten Modulation. Liegt der Fall vor, dass die Symbole am Empfänger eine zu große Energie aufweisen, so könnte alternative diese Energie dazu genutzt werden, die Modulationsart zu ändern und Symbole zu verwenden, die mehr Information tragen und daher
25 mehr Energie benötigen.

Als einfaches Beispiel sei hier der Fall betrachtet, dass in der Referenzzelle eine BPSK-Modulation verwendet wird, bei der jedes Symbol genau einem Bit

entspricht. Die erforderliche Empfangsenergie wird mit E_{b_min} bezeichnet, wobei der Index b auf Bit hinweisen soll.

Beim Übergang von der BSPK zur QPSK ändert sich nun beispielsweise der Informationsgehalt des Symbols von 1 Bit auf 2 Bit. Gleichzeitig steigt die notwendige Energie an, die zum sicheren Empfang der Symbole notwendig ist.
5 Es gilt dabei $E_{min}=2 \cdot E_{b_min}$.

Für das Energie-Budget-Management ergibt sich damit der Fall, dass die vorhandene Energie vom Empfänger vollständig genutzt werden kann, indem die Modulation den Gegebenheiten angepasst wird und nicht die Symboldauer
10 variiert wird, sondern der Informationsgehalt innerhalb der Symbole.

Prinzipiell gilt immer, dass die Symbolenergie umgerechnet werden kann in eine entsprechende Energie pro Bit:

$$E_s = \log_2(M) \cdot E_b \quad (16)$$

wobei M die Anzahl der verschiedenen „Zustände“ des Symbols beschreibt
15 und $\log_2(M)$ die Anzahl der Bit pro Symbol, wobei alle Zustände gleiche Wahrscheinlichkeit besitzen. Im allgemeinen Fall kann hier auch eine unterschiedliche Wahrscheinlichkeit betrachtet werden.

Verallgemeinernd wird nun angenommen, dass sich immer eine Modulationsart finden lässt, so dass die Symbole mit höherem Informationsgehalt im statistischen Mittel für jedes Bit die Energie E_{b_min} benötigen, so wie dies für die
20 gewählte Referenzzelle erforderlich ist.

In dieser Realisierungsform wird nur die Modulation der Symbole variiert. Die vom Sender (bzw. der Basisstation) abgestrahlte Energie ist dabei für jeden Teilnehmer immer gleich:

$$E_{symbol_send} = P_{send} \cdot T_{ref} = E_{send} = \text{konstant} . \quad (17)$$

Dies entspricht scheinbar dem Referenzfall, doch im EBM wird der Informationsgehalt der Symbole verändert. Dies offenbart sich, wenn die gesendete Energie pro Bit angegeben wird:

$$5 \quad E_{b_send_EBM} = \frac{E_{send}}{\log_2[M(r)]} . \quad (18)$$

Entsprechend den auftretenden Verlusten ergibt sich nun für einen nahen Teilnehmer ein höherer Informationsgehalt, d.h. ein großes M und für einen weiter entfernt liegenden Teilnehmer ein kleineres M. Die empfangene Energie pro Bit soll dagegen immer dem minimalen Wert entsprechen (29), so dass
 10 sich über der Entfernung eine Funktion der gesendeten Energie für den betreffenden Teilnehmer ergibt.

Die Gleichsetzung der beiden Ausdrücke (18) und (29) führt auf eine eindeutige Beschreibung der im Sender zu wählenden Modulation (31), wobei angenommen werden darf, dass die Anzahl der diskreten „Zustände“ des Symbols
 15 $M(r)$ hinreichend vielfältig sein können, um die gegebene, kontinuierliche Funktion gut zu approximieren.

Jeder Teilnehmer benötigt nun für die Übertragung einer vorgegebenen Informationsmenge nicht eine Anzahl von Symbolen, sondern nur von Bits. Damit ist die Energie, die ein einzelner Teilnehmer in Anspruch nimmt, nur von der
 20 Anzahl der Bit und der Energie des einzelnen Bit abhängig, so dass sich in Summe über gleichberechtigte Teilnehmer für die Anwendung des Energie-Budget-Management das Integral (32) ergibt.

Mit den oben angegebenen Formeln lässt sich dieses Integral einfach berechnen (33) und ergibt den vorher bereits in der allgemeinen Ableitung enthaltenen
 25 Ausdruck (24).

Geändert wurde hier nur die Bezeichnung der minimalen Energie, da hier eine Unterscheidung von Bit- und Symbolenergie notwendig war. Für den klassische Fall gilt dagegen weiterhin (34). Dies entspricht exakt der vorher angegebenen allgemeinen Ableitung, so dass abschließend festgehalten werden
5 kann, dass das beschriebene Energie-Budget-Management prinzipiell auch durch eine höherstufige Modulation optimal umgesetzt werden kann.

Anhand der Figuren 6 und 7 wird nachfolgend als weiteres Ausführungsbeispiel ein Time-Division-Multiple-Access Verfahren (TDMA) betrachtet.

Die Figuren 6 und 7 zeigen jeweils die Aufteilung einer bestimmten Zeitspanne
10 T_{FRAME} in Zeitabschnitte 70 bis 76 bzw. 80 bis 88 und 80' bis 84', so genannte Zeitschlitzze (time slots). In einem herkömmlichen TDMA-Verfahren wird eine Trennung der Teilnehmer auf der Zeitachse vorgenommen, indem jedem Teilnehmer ein bestimmter Zeitschlitz zugewiesen wird. Diese Zeitschlitzze treten periodisch mit Zeitabständen T_{FRAME} auf, nach denen jeder Teil-
15 nehmer erneut einen Zeitschlitz zugewiesen bekommt. Der Abschnitt 76 in Figur 6 kennzeichnet eine Zeitspanne mit einer Anzahl weiterer Zeitschlitzze der Dauer T_{Channel} .

In einem Netzwerk sind nun die Kanalbedingungen für den einzelnen Nutzer unterschiedlich, so dass nach dem Verfahren des EBM verschiedene Symbol-
20 dauern und verschiedene Modulationen angewendet werden müssen, um die vorhandenen Ressourcen optimal zu nutzen.

Wird dabei die Anzahl der übertragenen Bit pro Zeitschlitz festgehalten, und damit dem Teilnehmer eine unveränderte Datenrate garantiert, so wird die Dauer der Zeitschlitzze dynamisch nach den Kanalbedingungen verändert.
25 Dies ist in Figur 7 anhand der unterschiedlichen Breite der Zeitschlitzze 80 bis 88 und 80', 82' und 84' zu erkennen. Die Organisation dieser verschieden langen Zeitschlitzze ist im TDMA relativ einfach.

Gegenüber einer Referenzzelle wird in der Regel die Zeitdauer eines Paketes reduziert, da, wie bereits mehrfach erläutert, der klassische Entwurf auf den „worst case“ ausgelegt wird und alle näheren Stationen eine zu große Leistung empfangen, wie Figur 2 zeigt. Die Effizienz des EBM ist damit sofort offensichtlich.

Die Ausführung des EBM kann nun z.B. bei festgehaltener Symboldauer und damit unveränderter Bandbreite durch eine höherstufige Modulation erfolgen, so dass zur Übertragung einer vordefinierten Information weniger Symbole und damit ein kürzerer Zeitschlitz erforderlich ist. Exemplarisch sei hier eine QAM erwähnt, so dass der Informationsgehalt der Symbole schrittweise erhöht werden kann, von QPSK bis z.B. 256 QAM.

Im Empfänger sind die notwendigen Änderungen des Detektors relativ gering. Neben der reinen Phasendetektion ist bei der QAM zusätzlich ein Amplitudendetektor notwendig.

Zur Bestimmung des optimalen Symbols für das EBM kann hier eine einfache Regelung verwendet werden, indem im Access-Kanal zunächst die einfachste Modulation angewendet wird und dann schrittweise eine höherstufige Modulation, deren Symbole einen höheren Informationsgehalt besitzen. Dieser Informationsgehalt kann dann erhöht werden, bis entweder das informationshaltigste Symbol verwendet wird, oder die Übertragungsqualität (bestimmt durch die Bit-Fehler-Rate) nicht mehr den Ansprüchen genügt.

Alternativ könnte die Leistung des empfangenen Signals gemessen werden und aufgrund dieser Information das günstigste Symbol sofort bestimmt werden, ohne eine schrittweise Regelung zu durchlaufen.

Diese Optimierung ist für jeden Teilnehmer einzeln durchzuführen. Aufgrund der kanalspezifischen Zeitschlitzlängen ist dann eine neu Organisation des TDMA notwendig, bei der die Zeitmarken für den Beginn der einzelnen Zeitschlitze dynamisch den Veränderungen des Netzes angepasst werden.

Dabei können so viele Zeitschlitzte vergeben werden, bis der vorgegebene Zeitrahmen T_{FRAME} optimal gefüllt ist.

Zusätzlich kann der Fall auftreten, dass durch Störungen oder Abschattung die Energie der Symbole für einzelne Teilnehmer zu klein ist. Im klassischen
5 TDMA ist dann keine Verbindung möglich.

In diesen Fällen muss zusätzlich eine Verlängerung der Symboldauer erfolgen, z.B. indem die Dauer schrittweise verdoppelt wird unter Anwendung der einfachsten Modulation, bis entweder die maximale Symboldauer erreicht ist, oder die Übertragungsqualität (bestimmt durch die Bit-Fehler-Rate) den An-
10 sprüchen genügt.

Der Empfänger muss dabei ggf. sein „matched Filter“ anpassen, so dass die vorhandene Energie des Symbols optimal genutzt wird.

In der Kombination beider Regelungen wird die Qualität der Übertragung für alle Teilnehmer des TDMA durch Einführung des EBM deutlich verbessert.

15 Anhand der Figur 8a wird nachfolgend die Anwendung des EBM auf ein MDMA-Verfahren erläutert.

Die Erzeugung langer Symbole in einem Sender bereitet oft keine Schwierigkeiten. Im Empfänger kann es dagegen große Probleme bereiten, lange Symbole mit geringer Bandbreite zu empfangen, insbesondere wenn ein FDMA
20 verwendet wird und die Frequenz genau getroffen werden muss.

In der Regel ist es hier günstiger, die Symbole zu spreizen und einen Korrelationsempfänger zu verwenden. Dies gilt gleichermaßen für alle Pseudo-Noise-Sequenzen (Maximal-Längen Folgen (m-Sequenzen), Gold-Codes usw.), wie auch für alle Arten von Chirpsignalen.

Auch diese Empfängertypen entsprechen im Grunde dem klassischen „Matched Filter“, dass zur optimalen Übertragung verwendet wird.

Aufgrund des dynamischen Energie-Budget-Management und damit Symbol-dauer-Variation muss dieses Filter ebenfalls dynamisch angepasst werden. In
5 einer Realisierung als „Software radio“ ist auch dieses möglich.

Eine Sonderstellung nehmen hierbei die Chirpsignale ein. Dort ist es möglich, die einzelnen Signale zeitlich zu superponieren, so dass die physikalischen Symbole eine andere Zeitdauer aufweisen, als die logischen Symbole.

Im Empfänger werden diese Symbole durch das Kompressionsfilter wieder
10 voneinander getrennt und zu kurzen Impulsen geformt, die den Abstand $n \cdot \delta$ [s] zueinander einhalten.

In diesem Fall ist es möglich, die Dauer der physikalischen Symbole $T_{\text{chirp}} \gg \delta$ konstant zu halten, wenn die Dauer T_{symbol} und damit die Datenrate der logischen Symbole durch das Energie-Budget-Management verändert wird.

15 Da durch die Chirpsignale die genutzte Bandbreite B [Hz] immer gleich bleibt, verändert sich lediglich der enthaltene Spreizgewinn, der sich als $B \cdot n \cdot \delta = n$ berechnet, wenn die Zeitdauer δ der komprimierten Chirpsignale dem Kehrwert der Bandbreite B entspricht.

Der entscheidende Vorteil dabei ist, dass im Empfänger immer das gleiche
20 Korrelationsfilter oder der gleiche Korrelationsvorgang verwendet werden kann.

In der Figur 8a ist dieser Fall dargestellt. Dort ist die minimale logische Symboldauer mit δ [s] bezeichnet. Dieser Wert entspricht dem Kehrwert der Bandbreite B [Hz]. Die Frequenz-Spreizung beträgt daher zunächst 1 und wird
25 schrittweise erhöht auf 2, 4, 8 usw. indem die physikalische Pulsdauer δ beibehalten und die Wiederholrate schrittweise verringert wird.

Dabei nimmt die in den physikalischen Symbolen enthaltene Energie schrittweise zu, da die Amplitude der Impulse ansteigt.

5 Bevor diese Signale ausgesendet werden, erfolgt eine Zeitspreizung, so dass das Sendesignal eine nahezu konstante Amplitude und damit konstante Sendeleistung aufweist. Diese Spreizung kann z.B. mit dispersiven Gruppenlaufzeitfiltern erfolgen, so dass jeder schmale Impuls durch ein Chirpsignal vorgegebener Dauer und Bandbreite ersetzt wird.

Im Empfänger findet ein komplementärer Prozess statt, so dass die Chirpsignale wieder zu schmalen Impulsen komprimiert werden.

10 Diese Form der Zeitspreizung wurde bereits in der Patentschrift DE 199 37 706 eingehend erläutert und kann in dieser Form auch Vorteilhaft für die Anwendung des Energie-Budget-Management eingesetzt werden.

15 Die Menge der Sendesymbole in diesem speziellen Fall des MDMA zeichnet sich hier dadurch aus, dass n verschiedene Symbole zur Verfügung stehen, $n \leq T_{\text{chirp}}/\delta$, die Energie der Symbole ganzzahlige Vielfache der kürzesten Symbole sind, gleichzeitig mit der Energie auch der Spreizfaktor erhöht wird, und dem kürzesten Symbol eine höherstufige Modulationen (z.B. PSK oder QAM oder ASK ...) überlagert wird, so dass eine Anzahl von Symbolen mit höherem Informationsgehalt vorliegt.

20 Zur Bestimmung des optimalen Symbols für das EBM kann hier eine einfache Regelung verwendet werden, indem in dem Access-Kanal zunächst die längsten und aufgrund der großen Spreizung robustesten Symbole mit der größten Energie verwendet werden und schrittweise Symbole mit höherer Datenrate getestet werden, bis entweder die maximale Datenrate erreicht wird, oder die
25 Übertragungsqualität (beispielsweise bestimmt durch die Bit-Fehler-Rate) nicht mehr den Ansprüchen genügt.

Im Fall, dass die kürzesten Symbole verwendet werden, wird dann zusätzlich eine höherstufige Modulation angewendet, um jedem Symbol einen höheren Informationsgehalt zuzuweisen. Dieser Informationsgehalt kann erhöht werden, bis entweder das informationshaltigste Symbol verwendet wird, oder die
5 Übertragungsqualität (beispielsweise bestimmt durch die Bit-Fehler-Rate) nicht mehr den Ansprüchen genügt.

Alternativ könnte die Leistung des empfangenen Signals gemessen werden und aufgrund dieser Information das günstigste Symbol sofort bestimmt werden, ohne eine schrittweise Regelung zu durchlaufen.

10 Diese Optimierung des Energie-Budgets ist für jeden Teilnehmer innerhalb eines Netzes notwendig, da sich die Kanaleigenschaften in der Regel erheblich unterscheiden.

Figur 9 zeigt ein Ausführungsbeispiel einer Sender-Empfänger-Anordnung 150 für eine drahtlose Verbindung mit Energie-Budget-Management.

15 Ein von einer 152 Antenne empfangenes Signal wird zunächst in einem Verstärker 154 mit geringem Rauschen (Low-Noise Amplifier, LNA) verstärkt und dann in einem Empfänger 158 gleichzeitig auf einen RSSI-Detektor 156 und eine Demodulator- und Detektoreinheit 159 gegeben. Aus dem vom RSSI-Detektor 156 ausgegebenen Signal kann ein Mikroprozessor 160 die empfan-
20 ge Energie berechnen und daraus wiederum das optimale Symbol bestimmen, dass bei der gegebenen Empfangsqualität die höchste Datenrate beinhaltet und gleichzeitig hinreichend sicher empfangen werden kann. Das Ausgangssignal der Demodulator- und Detektoreinheit 159 wird zur weiteren Verarbeitung ebenfalls dem Mikroprozessor 160 zugeleitet.

25 In einem Handshake-Protokoll kann dann zwischen zwei Stationen die verwendete Symbolart vereinbart werden, wobei während der Phase dieser Abstimmung die sicherste Verbindung gewählt werden kann, d.h. die Übertragung mit den längsten Symbolen durchgeführt wird.

Entsprechend diesem Vorgehen weist auch die Sender-Empfänger-Anordnung der Figur 9 einen mit der Antenne 152 verbundenen Sender 162 auf, der ebenfalls mit dem Mikroprozessor 160 verbunden ist. Optional kann ein Speicher 164 mit abgespeicherten Parametern oder Signalmustern von Datensymbolen unterschiedlicher Dauer und Modulation vorgesehen sein. Der
5 Sender enthält einen ebenfalls eingangsseitig mit dem Mikroprozessor verbundenen Symbolgenerator 163, dem ein Verstärker (PA) nachgeschaltet ist.

Zwei mit einander kommunizierende Sender-Empfänger-Anordnungen sollten vorzugsweise flexibel ausgelegt sein. Es ist sogar möglich, dass die optimalen
10 Ergebnisse erzielt werden, indem der Sender 162 eine Symbolart aussendet und der Empfänger 158 desselben Gerätes im Rahmen einer Verbindung eine andere Symbolart empfängt.

Ein Sende-Empfangsumschalter 151 ist optional vorgesehen, um zwischen Sendebetrieb und Empfangsbetrieb umzuschalten.

15 Die Figuren 10 bis 13 zeigen Varianten des Ausführungsbeispiels der Figur 9. Die nachfolgende Beschreibung dieser Varianten konzentriert sich auf die Unterschiede zur Anordnung der Figur 9. Gleiche Bezugszeichen werden für im Vergleich zur Anordnung der Figur 9 entsprechende Einheiten verwendet.

Im Digitalteil 178 kann der Mikroprozessor 160 über eine verbundene Schnitt-
20 stelle („Interface“) 178 programmiert und gesteuert werden.

Die Sender- und Empfängeranordnung der Figur 10 ist zusätzlich für eine Chirp-Signal-Erzeugung ausgebildet. Hierzu weisen Empfänger 170 und Sender 172 zu einander komplementäre dispersive Verzögerungsstrecken DDL2 und DDL1 auf. Im Sender ist der Verzögerungsstrecke DDL1 ein vom Mikro-
25 prozessor 160 gesteuerter Symbolgenerator 174 vorgeschaltet. Im Empfänger 170 ist der Verzögerungsstrecke DDL2 ein Demodulator- und Detektor-Block 176 nachgeschaltet.

Erzeugte Symbole werden im Sender 172 mit Hilfe der Verzögerungsstrecke DDL1 in Chirpsignale transformiert. Diese nutzen die volle zur Verfügung stehende Bandbreite. Im Empfänger wird die Transformation mit Hilfe des komplementären Filters DDL2 rückgängig gemacht. Die lang gestreckten
5 Chirpsignale werden zu kurzen Signalpeaks umgeformt.

Die Sender- und Empfängeranordnung der Figur 11 unterscheidet sich von der der Figur 10 durch eine im Empfängerteil 170 zusätzlich vorgesehene Kanalschätzungseinheit 182. Damit kann die Bestimmung der optimalen Energie der zu sendenden Signale optimiert werden. So kann die notwendige Sprei-
10 zung sowie die dabei erforderliche Energie direkt geschätzt werden, ohne in einem langwierigen Prozess alle zur Verfügung stehenden Symbole zu testen.

Figur 12 zeigt eine Variante, bei der gegenüber der Anordnung der Figur 11 die Erzeugung einer Pseudo-Noise-Sequenz zur Spreizung der Signale vorgesehen ist. Hierzu ist ein dem Symbolgenerator 174 vorgeschalteter m-
15 Sequenz-Generator 184 im Digitalteil 178 vorhanden. Die gespeicherten möglichen Symbolauern betragen nun ein Vielfaches einer Chipdauer. Vor dem Senden der Symbole wird dem Symbol im Symbolgenerator 174 der erforderliche Teil der m-Sequenz überlagert, so dass die Symbole auf maximale Bandbreite gespreizt werden. Zusätzlich ist eine Pulsformung in einer Puls-
20 formeinheit 186 vorgesehen, so dass die vorgegebene Bandbreite eingehalten wird.

Figur 13 zeigt eine Variante in Form eines Transceiver-Moduls 190, das als Software Radio ausgebildet ist, welches programmierbare Funktionsblöcke aufweist, die den oben beschriebenen Einheiten der dort beschriebenen Sen-
25 der-Empfänger-Anordnungen in ihrer Funktion entsprechen.

Im weiteren Unterschied zu den Anordnungen der vorhergehenden Figuren ist hier ein Chirp-Signal-Generator 192 vorgesehen. Ein Analog-Digital-Wandler wandelt auf Empfängerseite die eingehenden Analogsignale in Digitalsignale

zur Weiterverarbeitung im Digitalteil. Zum Senden ist entsprechend ein Digital-Analog-Wandler 196 vorgesehen.

Anhang 1

Tabellarische Übersicht der verwendeten Größen und Symbole

Größe/Symbol	Einheit	Beschreibung
$\circ - \bullet$		Symbol, das die Fouriertransformation kennzeichnet
\Leftrightarrow		Symbol, das die Äquivalenz zweier Gleichungen anzeigt
\Rightarrow		Symbol, das eine logische Konsequenz anzeigt
$\overset{!}{=}$		Symbol, das ein Postulat anzeigt, hier eine postulierte Identität
α		Ausbreitungskoeffizient
δ	[s]	Zeitdauer des komprimierten Chirpsignals
λ	[mm]	Wellenlänge
φ	[rad]	Azimuth-Winkel
ψ	[W/W]	Speizgewinn
ω	[Hz]	Kreisfrequenz
B	[Hz]	Bandbreite
A	[m ²]	Fläche
BER		Bit Error Rate
BLER		Block Error Rate
C	[bit/s]	Kanalkapazität
E	[Ws]	Energie
E _b	[Ws]	Energie eines Bit

E_{b_min}	[Ws]	minimale Energie, die zum Empfang eines Bit erforderlich ist.
$E_{b_receive_EBM}$	[Ws]	Energie im EBM pro empfangenem Bit
$E_{b_send_EBM}$	[Ws]	Energie im EBM pro gesendetem Bit
E_{BS_EBM}	[Ws]	Energie, die in Summe von einer Basisstation abgestrahlt wird, für den Entwurf einer Zelle unter Anwendung des EBM
$E_{BS_classical}$	[Ws]	Energie, die in Summe von einer Basisstation abgestrahlt wird, für einen klassischen Entwurf einer Zelle
ED	[Ws/Hz/s]	Energiedichte (z.B. nach Wigner-Ville)
E_{min}	[Ws]	minimale Energie pro Symbol, die zum Empfang erforderlich ist.
$E_{receive}$	[Ws]	empfangene Energie pro Symbol
E_s	[Ws]	Symbolenergie
ESD	[Ws/Hz]	Energie-Spectral-Density
E_{send}	[Ws]	Energie des gesendeten Symbols
E_{send_EBM}	[Ws]	Energie des gesendeten Symbols unter Anwendung des EBM
E_{symbol_send}	[Ws]	Energie des gesendeten Symbols
f_1	[Hz]	Untere Grenzfrequenz eines Spektrums
f_2	[Hz]	Obere Grenzfrequenz eines Spektrums
f_{active}	[1/m ²]	Dichte der aktiven Nutzer pro Flächeneinheit
f_{active_EBM}	[1/m ²]	Dichte der aktiven Nutzer pro Flächeneinheit unter Anwendung des EBM
FER		Frame Error Rate
f_g	[Hz]	obere Grenzfrequenz im Basisband

M		Anzahl der verschiedenen „Zustände“ eines Symbols
N	[W]	Rauschleistung
n		Anzahl verschiedener Symbole im MDMA mit verschiedenen Symboldauern
N_0	[W / Hz]	Rauschleistungsdichte
N_{channel}		Anzahl der aktiven Kanäle in einer Zelle
$N_{\text{channel_EBM}}$		Anzahl der aktiven Kanäle in einer Zelle unter Anwendung des EBM
P_{receive}	[W]	empfangene Leistung pro Symbol
P_{send}	[W]	maximale Sendeleistung
r	[m]	Entfernungsvariable
r_{cell}	[m]	Radius einer Zelle
r_{EBM}	[m]	Radius einer Zelle bei Anwendung des EBM
R_{ref}	[bit/s]	Datenrate pro Teilnehmer in Referenzzelle
r_{ref}	[m]	Radius einer Referenzzelle
R_{user}	[bit/s]	Datenrate pro Nutzer (user)
S	[W]	empfangsseitige Signalleistung
t_1	[s]	Zeitpunkt
t_2	[s]	Zeitpunkt
t_3	[s]	Zeitpunkt
T	[s]	minimale Symboldauer bzgl der Bandbreite B
T_{Channel}	[s]	Dauer eines Zeitschlitzes im TDMA
T_{Chirp}	[s]	Zeitdauer eines Chirp-Signals

T_{FRAME}	[s]	Rahmen-Zeitdauer
T_{ref}	[s]	Symboldauer in einer Referenzzelle
T_{symbol}	[s]	zeitliche Dauer eines Symbols
$T_{\text{symbol_EBM}}$	[s]	zeitliche Dauer eines Symbols unter Anwendung des EBM

Anhang 2Formeln der Berechnungen zur Figur 5

$$E_{receive}(r) = \frac{E_{send}}{1 + \left(\frac{4 \cdot \pi \cdot r}{\lambda} \right)^2}$$

$$E_{min} = P_{receive}(r_{ref}) \cdot T_{ref} = \frac{P_{send} \cdot T_{ref}}{1 + \left(\frac{4 \cdot \pi \cdot r_{ref}}{\lambda} \right)^2} = \frac{E_{send}}{1 + \left(\frac{4 \cdot \pi \cdot r_{ref}}{\lambda} \right)^2}$$

$$5 \quad f_{active}(r, \varphi) = \frac{N_{channel}}{\pi \cdot r_{ref}^2}$$

$$E_{send_EBM}(r) = \left[1 + \left(\frac{4 \cdot \pi \cdot r}{\lambda} \right)^2 \right] \cdot E_{min}$$

$$E_{BS_EBM} = \iint_A E_{send_EBM}(r) \cdot f_{active}(r, \varphi) \cdot dA$$

$$E_{BS_EBM}(r_{cell}) = \frac{1}{2} E_{min} \cdot \frac{N_{channel_EBM}}{r_{ref}^2} \cdot \left[2 + \left(\frac{4 \cdot \pi \cdot r_{cell}}{\lambda} \right)^2 \right] \cdot r_{cell}^2$$

$$2 \ll \left(\frac{4 \cdot \pi \cdot r_{ref}}{\lambda} \right)^2$$

$$10 \quad f_{active}(r, \varphi) = \frac{N_{channel}}{\pi \cdot r_{ref}^2} = f_{active_EBM}(r, \varphi) = \frac{N_{channel_EBM}}{\pi \cdot r_{ref}^2}$$

$$E_{BS_EBM}(r_{cell}) = \frac{1}{2} E_{min} \cdot \frac{N_{channel}}{r_{ref}^2} \cdot \left[2 + \left(\frac{4 \cdot \pi \cdot r_{cell}}{\lambda} \right)^2 \right] \cdot r_{cell}^2 \stackrel{!}{=} E_{BS_classical}$$

$$\frac{1}{2} \frac{2 + \left(\frac{4 \cdot \pi \cdot r_{EBM}}{\lambda} \right)^2}{1 + \left(\frac{4 \cdot \pi \cdot r_{ref}}{\lambda} \right)^2} \cdot \frac{r_{EBM}^2}{r_{ref}^2} = 1$$

$$E_{b_receive_EBM} = \frac{E_{b_send_EBM}}{1 + \left(\frac{4 \cdot \pi \cdot r}{\lambda} \right)^2} = E_{b_min}$$

$$E_{b_send_EBM}(r) = \left[1 + \left(\frac{4 \cdot \pi \cdot r}{\lambda} \right)^2 \right] \cdot E_{b_min}$$

$$5 \quad \log_2[M(r)] = \frac{1}{1 + \left(\frac{4 \cdot \pi \cdot r}{\lambda} \right)^2} \cdot \frac{E_{send}}{E_{b_min}},$$

$$E_{BS_EBM} = \iint_A E_{b_send_EBM}(r) \cdot f_{active}(r, \varphi) \cdot dA.$$

$$E_{BS_EBM}(r_{cell}) = \frac{1}{2} E_{b_min} \cdot \frac{N_{channel_EBM}}{r_{ref}^2} \cdot \left[2 + \left(\frac{4 \cdot \pi \cdot r_{cell}}{\lambda} \right)^2 \right] \cdot r_{cell}^2,$$

$$E_{BS_classical} = N_{channel} \cdot E_{send} = \left[1 + \left(\frac{4 \cdot \pi \cdot r_{ref}}{\lambda} \right)^2 \right] \cdot E_{b_min}$$

Ansprüche

1. Verfahren zur Übertragung einer Vielzahl von Symbolen mit je mindestens einem Bit von einem Sender zu mindestens einem Empfänger unter Verwendung mindestens eines Kanals und einer vorgegebenen Sendeleistung,
- 5 - bei dem die Symbole mit einer empfängerspezifischen Sendeenergie gesendet werden, die auf Seiten des Empfängers zum Empfang des Symbols mit einer Empfangsenergie führt, welche einem dem Empfänger zugeordneten oberen Grenzwert oder einem im Vergleich mit dem
- 10 oberen Grenzwert geringeren Wert einer Fehl-Erkennungsrate entspricht, und
- bei dem zur Erzielung der empfängerspezifischen Sendeenergie und gleichzeitig einer möglichst hohen Bitrate in Abhängigkeit von aktuellen Übertragungsbedingungen zwischen Sender und Empfänger die Symboldauer, oder die Anzahl je Symbol übertragener Bits, oder die Symbol-
- 15 boldauer und die Anzahl je Symbol übertragener Bits angepasst wird.
2. Verfahren zur Organisation eines Netzwerkes, bei dem für jede Übertragung einer Vielzahl von Symbolen mit je mindestens einem Bit von einem Sender zu mindestens einem Empfänger unter Verwendung mindestens eines Kanals und einer vorgegebenen Sendeleistung die Sym-
- 20 bole gesendet werden:
- mit einer empfängerspezifischen Sendeenergie, die auf Seiten des Empfängers zum Empfang des Symbols mit einer Empfangsenergie führt, welche einem dem Empfänger zugeordneten oberen Grenzwert
- 25 oder einem geringeren Wert einer Fehl-Erkennungsrate entspricht,
- wobei in Abhängigkeit von aktuellen Übertragungsbedingungen zwischen Sender und Empfänger zur Erzielung der empfängerspezifischen Sendeenergie und gleichzeitig einer möglichst hohen Bitrate die Symboldauer, oder die Anzahl je Symbol übertragener Bits oder die Symbol-
- 30 boldauer und die Anzahl je Symbol übertragener Bits angepasst wird.

3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, bei dem ausschließlich die Symboldauer angepasst wird.
4. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, mit einem Schritt der Auswahl zwischen drei zur Verfügung stehenden Anpassungsmöglichkeiten, nämlich
5 einer Anpassung der Symboldauer, einer Anpassung der Anzahl je Symbol übertragener Bits, und einer Anpassung sowohl der Symboldauer als auch der Anzahl je Symbol übertragener Bits.
5. Verfahren nach einem der vorstehenden Ansprüche, bei dem kanalspezifisch im zeitlichen Mittel die vorgegebene Sendeleistung und/oder die
10 abgestrahlte elektrische Feldstärke und/oder die abgestrahlte magnetische Feldstärke und/oder die spektrale Leistungsdichte im Rahmen zulässiger Leistungsabstrahlung oder eine mit einer oder mehreren dieser Größen korrelierte Größe einen Grenzwert annimmt, der der maximal möglichen Sendeenergie pro Zeiteinheit im Rahmen zulässiger Abstrahlung entspricht..
15
6. Verfahren nach einem der vorstehenden Ansprüche, bei dem die vorgegebene Sendeleistung im zeitlichen Mittel im Rahmen der technischen Auslegung des Senders maximal ist.
7. Verfahren nach einem der vorstehenden Ansprüche, bei dem die Sendeleistung vorgegeben werden kann.
20
8. Verfahren nach einem der vorstehenden Ansprüche, mit einem zusätzlichen Schritt des Ermitteln eines aktuellen Wertes der Empfangsenergie bei gegebener Sendeenergie.
9. Verfahren nach einem der vorstehenden Ansprüche, bei dem auf Seiten
25 des Empfängers eine RSSI-Messung (radio signal strength indicator) der empfangenen Leistung durchgeführt und dem Sender ein vom Mess-Ergebnis abhängiges Signal übertragen wird.

10. Verfahren nach einem der vorstehenden Ansprüche, mit einem alternativen oder zusätzlichen Schritt des Ermitteln eines aktuellen Wertes der Fehl-Erkennungsrate.
- 5 11. Verfahren nach Anspruch 10, bei dem die Fehl-Erkennungsrate durch Bestimmung der Anzahl der Fehler innerhalb eines empfangenen Datenrahmens ermittelt wird.
12. Verfahren nach Anspruch 10 oder 11, bei dem die Fehl-Erkennungsrate durch Mittelung der Fehleranzahl in einer Mehrzahl von Datenrahmen ermittelt wird.
- 10 13. Verfahren nach Anspruch 12, bei dem die Fehl-Erkennungsrate mit Hilfe der Anzahl negativer Quittungssignale des Empfängers über eine vorgegebene Zeitspanne ermittelt wird.
14. Verfahren nach einem der vorstehenden Ansprüche, bei dem die Fehl-Erkennungsrate eine Bitfehlerrate (BER), eine Blockfehlerrate (BLER) oder eine Rahmenfehlerrate (FER) ist.
- 15 15. Verfahren nach einem der vorstehenden Ansprüche, bei dem die Anpassung der Symboldauer in Abhängigkeit vom aktuellen Wert der empfängerseitigen Fehl-Erkennungsrate oder von einem aktuellen, empfängerseitigen Betrag der Rauschleistungsdichte erfolgt.
- 20 16. Verfahren nach einem der vorstehenden Ansprüche, bei dem der Empfänger dem Sender die aktuelle Fehl-Erkennungsrate oder den aktuellen Betrag der Rauschleistungsdichte übermittelt.
17. Verfahren nach einem der vorstehenden Ansprüche, bei dem der Sender die aktuelle empfängerseitige Fehl-Erkennungsrate oder den aktuellen Betrag der Rauschleistungsdichte schätzt.
- 25

18. Verfahren nach einem der vorstehenden Ansprüche, bei dem die Symboldauer oder die Anzahl der in einem Symbol enthaltenen Bits oder beides in Abhängigkeit von aktuellen Übertragungsbedingungen zwischen Sender und Empfänger dynamisch in einer bestehenden Verbindung oder einem laufenden Datenverkehr nachgeregelt wird, ohne dass die Verbindung oder der Datenverkehr unterbrochen wird.
19. Verfahren nach einem der vorstehenden Ansprüche, bei dem die Änderung der Symboldauer zeitlich kontinuierlich, alternativ quasi-kontinuierlich, alternativ in vorbestimmten Zeitabständen erfolgt.
20. Verfahren nach einem der vorstehenden Ansprüche, bei dem die Symboldauer kanalspezifisch, also auf jedem verwendeten Kanal individuell angepasst wird.
21. Verfahren nach einem der vorstehenden Ansprüche, bei dem die Symboldauer zu kurzen Symboldauerwerten hin kanalspezifisch durch die Bandbreite des Kanals beschränkt ist.
22. Verfahren nach einem der vorstehenden Ansprüche, bei dem die Symboldauer aus einem kontinuierlichen Wertespektrum bestimmt wird.
23. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 21, bei dem die Symboldauer aus einem diskreten Wertespektrum bestimmt wird, wobei das diskrete Wertespektrum die ganzzahligen Vielfachen einer kanalspezifisch kürzestmöglichen Symboldauer enthält.
24. Verfahren nach einem der vorstehenden Ansprüche, bei dem die Symboldauer T_{symbol} senderseitig entsprechend der Formel

$$T_{symbol} = \frac{E_{min} \cdot \left(\frac{r}{r_0} \right)^\alpha}{P_{send}},$$

- bestimmt wird, wobei E_{\min} die Empfangsenergie ist, die dem Empfänger zugeordneten oberen Grenzwert der Fehl-Erkennungsrate entspricht, P_{send} die maximale Sendeleistung, r die Entfernung zwischen Sender und Empfänger, r_0 eine Bezugsentfernung und α einen Ausbreitungskoeffizienten bezeichnet.
- 5
25. Verfahren nach einem der vorstehenden Ansprüche, bei dem die Auswahl der Anzahl je Symbol übertragener Bits in Abhängigkeit vom aktuellen Wert der empfängerseitigen Fehl-Erkennungsrate oder von einem aktuellen, empfängerseitigen Betrag der Rauschleistungsdichte erfolgt.
- 10
- 10 26. Verfahren nach einem der vorstehenden Ansprüche, bei dem die Anzahl je Symbol übertragener Bits kanalspezifisch angepasst wird.
27. Verfahren nach einem der vorstehenden Ansprüche, bei dem eine Anpassung der Anzahl je Symbol übertragener Bits dann erfolgt, wenn eine kanalspezifisch kürzeste Symboldauer bereits verwendet wird.
- 15 28. Verfahren nach einem der vorstehenden Ansprüche, bei dem ein Symboltyp mit der höchstmöglichen Anzahl an Bits zur Übertragung ausgewählt wird, welche empfängerseitig den oberen Grenzwert der Fehl-Erkennungsrate nicht überschreiten lässt.
29. Verfahren nach einem der vorstehenden Ansprüche, bei dem die Symbole jeweils auf eine Sequenz von Chips aufgeteilt übertragen werden.
- 20
30. Verfahren nach Anspruch 29, bei dem die Symbole in der Frequenz gespreizt werden, indem sie mit einer Noise- oder Pseudo-Noise-Sequenz moduliert werden, wobei die Noise- oder Pseudo-Noise-Sequenz dem Empfänger bekannt ist.
- 25 31. Verfahren nach Anspruch 30, bei dem die Noise- oder Pseudo-Noise-Sequenz dynamisch der gewählten Symboldauer angepasst wird.

32. Verfahren nach einem der vorstehenden Ansprüche, bei dem die Symbole derart übertragen werden, dass die zur Verfügung stehende Kanalbandbreite voll genutzt wird.
- 5 33. Verfahren nach einem der vorstehenden Ansprüche, bei dem die Symbole in der Frequenz gespreizt übertragen werden.
34. Verfahren nach einem der vorstehenden Ansprüche, bei dem die Symbole in Form eines Chirpsignals gesendet werden.
35. Verfahren nach Anspruch 34, bei dem sich für einen jeweiligen Empfänger bestimmten Chirpsignale des Senders zeitlich überlagern.
- 10 36. Verfahren nach Anspruch 35, bei dem die Summe der in einem Zeitpunkt ausgestrahlten Sendeleistungen der sich überlagernden Chirpsignale gleich der maximal zulässigen Sendeleistung auf dem jeweiligen Kanal ist.
- 15 37. Verfahren nach einem der vorstehenden Ansprüche, bei dem die Symbole in Form einer CDMA-Sequenz übertragen werden.
38. Verfahren nach einem der vorstehenden Ansprüche, bei dem die Symbole im Rahmen eines FDMA-Verfahrens übertragen werden.
- 20 39. Verfahren nach Anspruch 38, bei dem die Aufteilung in FDMA-Kanäle dynamisch erfolgt, derart, dass Empfängern mit guten Kanal-Übertragungsbedingungen eine geringere Bandbreite zugewiesen wird.
40. Verfahren nach einem der vorstehenden Ansprüche, bei dem auf mindestens einem Kanal ein TDMA-Verfahren verwendet wird.
41. Verfahren nach einem der vorstehenden Ansprüche, bei dem der Sender ein mobiles Endgerät eines Nutzers ist und vor der Übertragung der

Symbole zu einer Basisstation von der Basisstation Information über ein für die Übertragung zu nutzendes Frequenzband erhält.

5 42. Verfahren nach einem der vorstehenden Ansprüche, bei dem eine als Empfänger fungierende Basisstation eingehende Signale eines als Sender fungierenden mobilen Endgerätes mit einer Mehrzahl Modulationsarten prüft und eine als zutreffend erkannte Modulationsart für den Empfang der Signale des mobilen Endgerätes verwendet.

10 43. Verfahren nach einem der vorstehenden Ansprüche, bei dem eine als Empfänger fungierende Basisstation eingehende Signale mit Hilfe einer Mehrzahl Empfänger empfängt, wobei jedem Empfänger eine Modulationsart zugeordnet ist, und ein als Sender fungierendes mobiles Endgerät eine der senderseitig zur Verfügung stehenden Modulationsarten zur Übertragung von Symbolen zur Basisstation verwendet.

15 44. Sender, ausgebildet zur Durchführung eines Verfahrens nach einem der vorhergehenden Ansprüche.

45. Sender zur Durchführung eines Verfahrens nach einem der vorhergehenden Ansprüche,

20 mit einer Sendeeinheit, die ausgebildet ist, logische Symbole repräsentierende Signale (nachfolgend als Symbole bezeichnet) zu erzeugen und auszusenden, wobei ein logisches Symbol entweder ein Bit oder mehrere Bits repräsentiert, und

25 mit einer Steuereinheit, die ausgebildet ist, anhand von vorliegenden Informationen über aktuelle Übertragungsbedingungen zwischen dem Sender und einem Empfänger der Symbole Steuersignale zu erzeugen und abzugeben, die der Sendeeinheit eine empfängerspezifische Sendeenergie vorschreiben, welche einem dem Empfänger zugeordneten oberen Grenzwert einer Fehl-Erkennungsrate oder einem im Vergleich

mit dem oberen Grenzwert geringeren Wert der Fehl-Erkennungsrate entspricht,

5 wobei die Steuereinheit zusätzlich ausgebildet ist, zur Erzielung der empfängerspezifischen Sendeenergie und gleichzeitig einer möglichst hohen Bitrate in Abhängigkeit von den aktuellen Übertragungsbedingungen zwischen Sender und Empfänger Steuersignale zu erzeugen und abzugeben, die der Sendeeinheit die Verwendung von Symbolen mit
10 entsprechend angepasster Symboldauer, oder mit entsprechend angepasster Anzahl je Symbol übertragener Bits, oder mit entsprechend angepasster Symboldauer und entsprechend angepasster Anzahl je Symbol übertragener Bits vorschreiben.

46. Sender nach einem der Anspruch 44, bei dem die Steuereinheit allein gemäß der Alternative ausgebildet ist, zur Erzielung der empfängerspezifischen Sendeenergie und gleichzeitig einer möglichst hohen Bitrate in
15 Abhängigkeit von den aktuellen Übertragungsbedingungen zwischen Sender und Empfänger Steuersignale zu erzeugen und abzugeben, die der Sendeeinheit die Verwendung von Symbolen mit entsprechend angepasster Symboldauer vorschreiben.

47. Sender nach einem der Ansprüche 44, 45 oder 46, bei dem die Steuereinheit ausgebildet ist, in Abhängigkeit von den aktuellen Übertragungsbedingungen zwischen Sender und Empfänger eine oder mehrere von
20 einer Anzahl zur Verfügung stehender Anpassungsmöglichkeiten zu wählen und ein die vorgenommene Auswahl anzeigendes Steuersignal zu erzeugen und abzugeben, wobei zu den Anpassungsmöglichkeiten
25 die Anpassung der Symboldauer, die Anpassung der Anzahl je Symbol übertragener Bits, und die Anpassung sowohl der Symboldauer als auch der Anzahl je Symbol übertragener Bits zählen.

48. Sender nach einem der Ansprüche 44 bis 47, bei dem die Steuereinheit ausgebildet ist, die Sendeeinheit so zu steuern, dass kanalspezifisch im

- 5 zeitlichen Mittel die Sendeleistung und/oder die abgestrahlte elektrische Feldstärke und/oder die abgestrahlte magnetische Feldstärke und/oder die spektrale Leistungsdichte im Rahmen zulässiger Leistungsabstrahlung gleich einem vorgegebenen Maximalwert ist oder im Rahmen der technischen Auslegung des Senders maximal ist oder eine mit einer oder mehreren dieser Größen korrelierte Größe einen Grenzwert annimmt, der der maximal möglichen Sendeenergie pro Zeiteinheit im Rahmen zulässiger Abstrahlung entspricht.
- 10 49. Sender nach einem der Ansprüche 44 bis 48, bei dem die Steuereinheit ausgebildet ist, die aktuelle Fehl-Erkennungsrate auf Seiten des Empfängers oder den aktuellen Betrag der Rauschleistungsdichte zu schätzen.
- 15 50. Sender nach einem der Ansprüche 44 bis 49, bei dem die Steuereinheit ausgebildet ist, die Symboldauer oder die Anzahl der in einem Symbol enthaltenen Bits oder beides in Abhängigkeit von aktuellen Übertragungsbedingungen zwischen Sender und Empfänger dynamisch in einer bestehenden Verbindung oder einem laufenden Datenverkehr neu zu bestimmen und der Sendeeinheit durch entsprechende Steuersignale vorzuschreiben, und dass die Sendeeinheit ausgebildet ist, die vorgeschriebenen Anpassungen ohne Unterbrechung der Verbindung oder
- 20 des Datenverkehrs vorzunehmen.
- 25 51. Sender nach einem der Ansprüche 44 bis 50, bei dem die Steuereinheit ausgebildet ist, die der Symboldauer zeitlich kontinuierlich, alternativ quasi-kontinuierlich, alternativ in vorbestimmten Zeitabständen neu zu bestimmen.
52. Sender nach einem der Ansprüche 44 bis 51, bei dem die Steuereinheit ausgebildet ist, die Symboldauer kanalspezifisch, also auf jedem verwendeten Kanal individuell zu bestimmen.

53. Sender nach einem der Ansprüche 44 bis 52, bei dem die Steuereinheit ausgebildet ist, die Symboldauer T_{symbol} entsprechend der Formel

$$T_{symbol} = \frac{E_{min} \cdot \left(\frac{r}{r_0} \right)^\alpha}{P_{send}},$$

- 5 zu bestimmen, wobei E_{min} die Empfangsenergie ist, die dem Empfänger zugeordneten oberen Grenzwert der Fehl-Erkennungsrate entspricht, P_{send} die maximale Sendeleistung, r die Entfernung zwischen Sender und Empfänger, r_0 eine Bezugsentfernung und α einen Ausbreitungskoeffizienten bezeichnet.
- 10 54. Sender nach einem der Ansprüche 44 bis 53, bei dem die Steuereinheit ausgebildet ist, die Auswahl der Anzahl je Symbol übertragener Bits in Abhängigkeit vom aktuellen Wert einer empfängerseitigen Fehl-Erkennungsrate oder von einem aktuellen, empfängerseitigen Betrag der Rauschleistungsdichte vorzunehmen.
- 15 55. Sender nach einem der Ansprüche 44 bis 54, bei dem die Steuereinheit ausgebildet ist, die Anzahl je Symbol übertragener Bits kanalspezifisch anzupassen.
56. Sender nach einem der Ansprüche 44 bis 55, bei dem die Steuereinheit ausgebildet ist, die Anpassung der Anzahl je Symbol übertragener Bits dann vorzunehmen, wenn eine kanalspezifisch kürzeste Symboldauer bereits verwendet wird.
- 20 57. Sender nach einem der Ansprüche 44 bis 56, bei dem die Steuereinheit ausgebildet ist, denjenigen Symboltyp mit der höchstmöglichen Anzahl an Bits zur Übertragung auszuwählen, welche empfängerseitig den oberen Grenzwert der Fehl-Erkennungsrate nicht überschreiten lässt.
- 25

58. Sender nach einem der Ansprüche 44 bis 57, bei dem die Sendeeinheit ausgebildet ist, die Symbole jeweils auf eine Sequenz von Chips aufgeteilt auszusenden.
- 5 59. Sender nach einem der Ansprüche 44 bis 58, bei dem die Sendeeinheit ausgebildet ist, die Symbole in der Frequenz gespreizt auszusenden, indem sie sie mit einer von der Steuereinheit vorgegebenen Noise- oder Pseudo-Noise-Sequenz moduliert, wobei die Noise- oder Pseudo-Noise-Sequenz dem Empfänger bekannt ist.
- 10 60. Sender nach einem der Ansprüche 44 bis 59, bei dem die Steuereinheit ausgebildet ist, die von der Sendeeinheit zu verwendende Noise- oder Pseudo-Noise-Sequenz dynamisch der gewählten Symboldauer anzupassen.
- 15 61. Sender nach einem der Ansprüche 44 bis 60, bei dem die Steuereinheit ausgebildet ist, die Sendeeinheit zu einer Aussendung der Symbole anzusteuern, derart, dass die zur Verfügung stehende Kanalbandbreite voll genutzt wird.
62. Sender nach einem der Ansprüche 44 bis 61, bei dem die Sendeeinheit ausgebildet ist, die Symbole in der Frequenz gespreizt auszusenden.
- 20 63. Sender nach einem der Ansprüche 44 bis 62, bei dem die Sendeeinheit ausgebildet ist, die Symbole in Form eines Chirpsignals auszusenden.
64. Sender nach einem der Ansprüche 44 bis 63, bei dem die Sendeeinheit ausgebildet ist, die für einen jeweiligen Empfänger bestimmten Chirpsignale zeitlich zu überlagern.
- 25 65. Sender nach Anspruch 64, bei dem die Summe der in einem Zeitpunkt ausgestrahlten Sendeleistungen der sich überlagernden Chirpsignale

gleich der maximal zulässigen Sendeleistung auf dem jeweiligen Kanal ist.

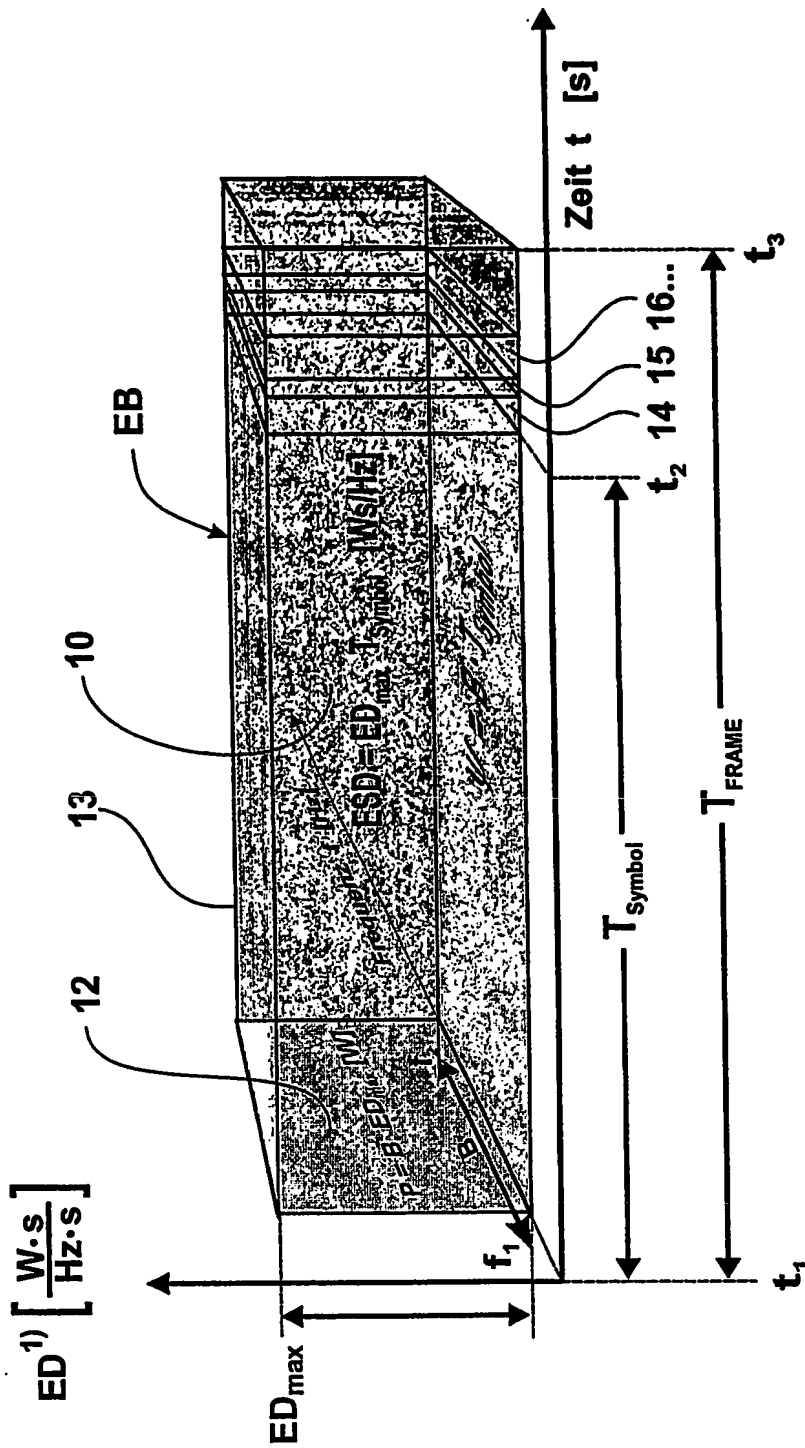
- 5 66. Sender nach einem der Ansprüche 44 bis 65, bei die Sendeeinheit ausgebildet ist, die Symbole in Form einer CDMA-Sequenz oder im Rahmen eines FDMA-Verfahrens oder im Rahmen eines TDMA-Verfahrens zu übertragen.
- 10 67. Sender nach einem der Ansprüche 44 bis 66, bei dem die Steuereinheit ausgebildet ist, in Abhängigkeit von den aktuellen Übertragungsbedingungen zwischen Sender und Empfänger ein Steuersignal zu erzeugen und abzugeben, das der Sendeeinheit die Verwendung eines aus einer Vielzahl zur Verfügung stehender Vielfach-Zugangs-Verfahren (Multiple-Access-Verfahren) in der Kommunikation mit diesem Empfänger vorschreibt.
- 15 68. Sender nach einem der Ansprüche 44 bis 67, bei dem die Sendeeinheit mit einem Datenspeicher verbunden ist, welcher Sendeparameter oder Signalmuster unterschiedlicher Symboltypen enthält.
69. Sender nach einem der Ansprüche 44 bis 68, mit einer dispersiven Verzögerungsstrecke zur Signalspreizung.
- 20 70. Sender nach einem der Ansprüche 44 bis 69, mit einem Sequenzgenerator, der mit der Sendeeinheit verbunden und ausgebildet ist, zur Signalspreizung eine m-Sequenz zu erzeugen.
71. Sender nach einem der Ansprüche 44 bis 70, bei dem aussendbare Signale in einem Speicher abgelegt sind oder aus einer Schieberegisterstruktur ausgelesen werden können.
- 25 72. Sender nach einem der Ansprüche 44 bis 71, bei dem die Sendeeinheit ausgebildet ist, ein beliebiges auszusendendes Signal durch Ausführung

eines oder mehrerer Algorithmen zu erzeugen, die in Form einer entsprechenden Schaltung oder in Form von Software implementiert sind, und das jeweils aktuell auszusendendes Signal in Abhängigkeit von Steuersignalen der Steuereinheit zu erzeugen.

- 5 73. Sender nach einem der Ansprüche 44 bis 72, bei dem die Sendeeinheit einen Signal-Sequenzner und eine diesem nachgeschaltete IQ-Modulatoreinheit aufweist, und ausgebildet ist, ein auszusendendes Signal nach seiner Erzeugung an den Signal-Sequenzner und anschließend an die IQ-Modulatoreinheit zu leiten und dann direkt ins Trägerband zu konvertieren.
- 10
74. Sender nach einem der Ansprüche 44 bis 73, bei dem die Sendeeinheit ausgebildet ist, zu übertragende Signale intern digital zu erzeugen, und bei dem die Sendeeinheit einen Digital-Analog-Wandler aufweist, dem die intern erzeugten digitalen Signale vor der Abstrahlung zugeleitet werden.
- 15
75. Sender nach einem der Ansprüche 44 bis 74, mit einer programmierbaren Senderstruktur (Software Radio).
76. Sender nach Anspruch 75, bei dem die Senderstruktur dynamisch veränderbar ist.
- 20 77. Sender nach einem der Ansprüche 44 bis 76, mit einer Kanalschätzungseinheit.
78. Sender-Empfänger-Vorrichtung, mit einer Sendervorrichtung und einer Empfängervorrichtung, bei der die Sendervorrichtung die Merkmale des Senders eines der Ansprüche 44 bis 77 aufweist.
- 25 79. Sender-Empfänger-Vorrichtung nach Anspruch 78, die als ein mobiles Endgerät eines Nutzers ausgebildet ist und bei dem die Empfängervor-

richtung ausgebildet ist, von einer zugeordneten Basisstation Information über ein für die Übertragung zu nutzendes Frequenzband zu empfangen und diese Information vor der Übertragung von Symbolen zu der Basisstation an die Sendervorrichtung weiterzuleiten.

- 5 80. Sender-Empfänger-Vorrichtung nach Anspruch 79, die als BasisSende-Empfangs-Station (Base Transceiver Station) eines Mobilfunknetzwerkes ausgebildet ist.
- 10 81. Sender-Empfänger-Vorrichtung nach einem der Ansprüche 78bis 80, bei dem die Empfängervorrichtung ausgebildet ist, eine RSSI-Messung (radio signal strength indicator) einer von einer zweiten Sender-Empfänger-Vorrichtung über einen Kommunikationskanal empfangenen Leistung durchzuführen und der Sendervorrichtung ein vom Messergebnis abhängiges Signal zu übermitteln, und bei der die Sendervorrichtung ausgebildet ist, ein das Messergebnis repräsentierendes Signal an die zweite Sender-Empfänger-Vorrichtung zu übertragen.
- 15 82. Sender-Empfänger-Vorrichtung nach Anspruch 81, bei der die Steuereinheit der Sendevorrichtung ihre Steuersignale in Abhängigkeit vom Ergebnis einer von der zweiten Sendevorrichtung her erhaltenen RSSI-Messung erzeugt. 83. Empfänger zur Durchführung des Verfahrens
- 20 nach einem der Ansprüche 1 bis 43.
83. Empfänger zur Durchführung des Verfahrens nach einem der Ansprüche 1 bis 43.



1) ED: Energiedichte nach Wigner - Ville

Fig. 1

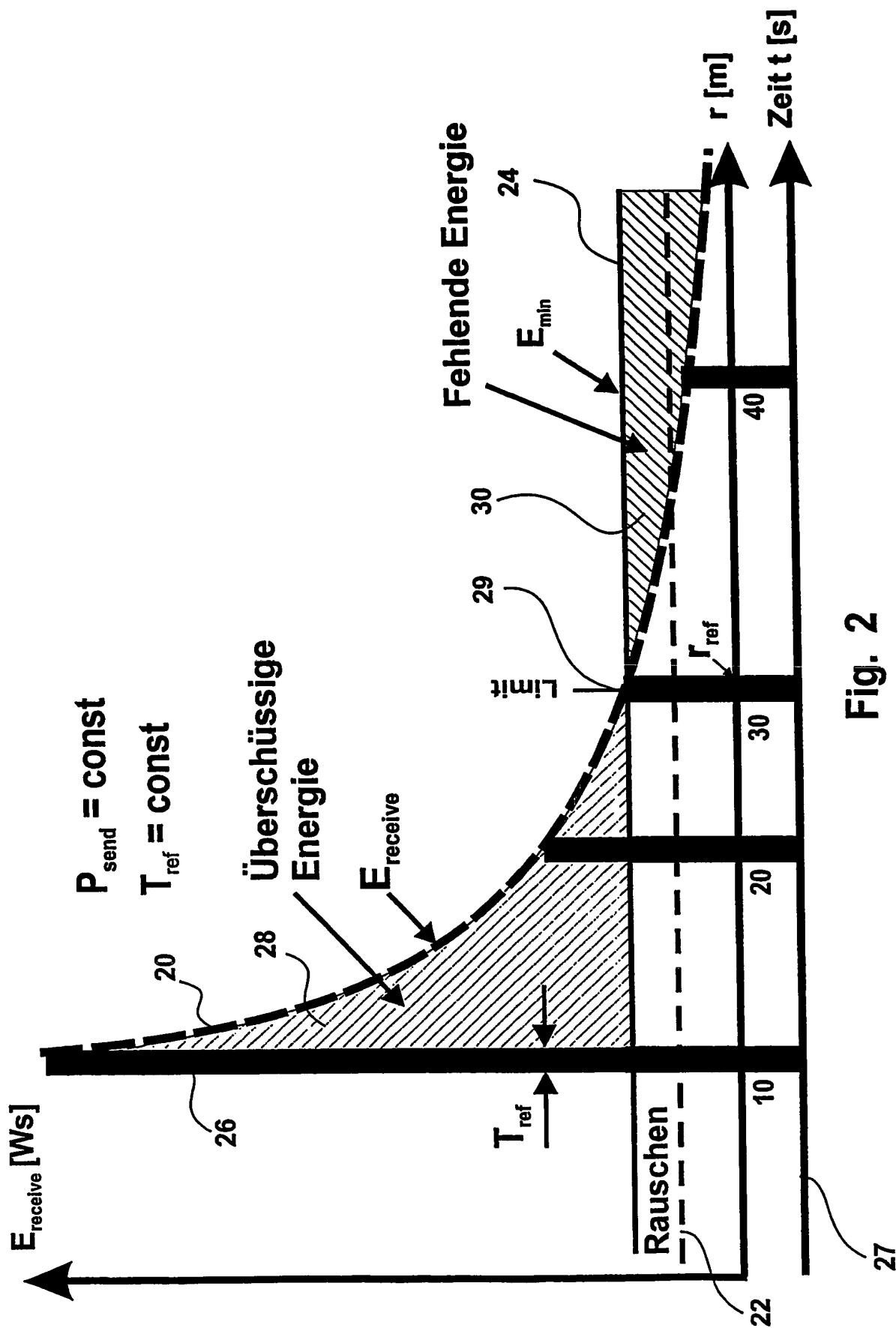


Fig. 2

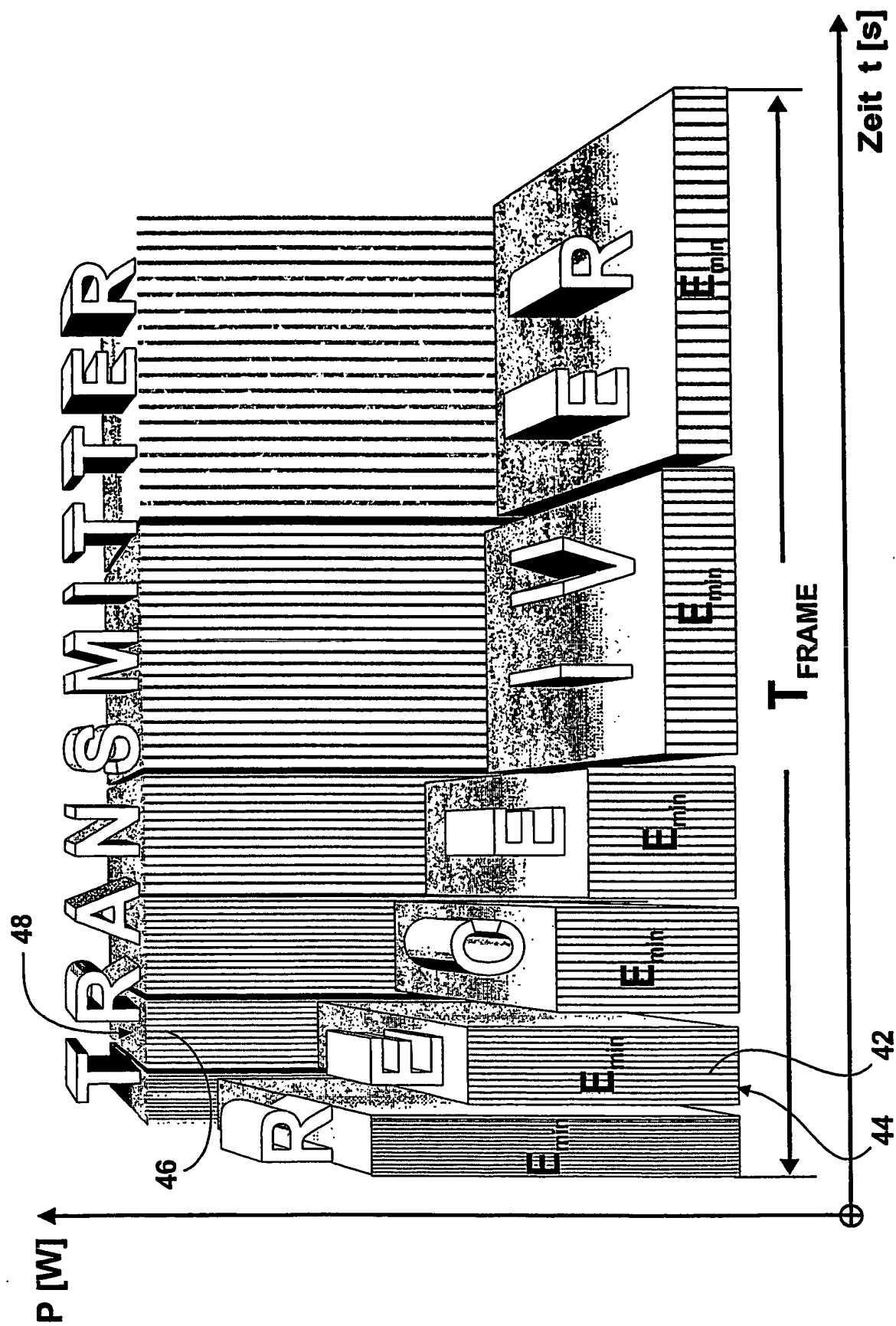


Fig. 3

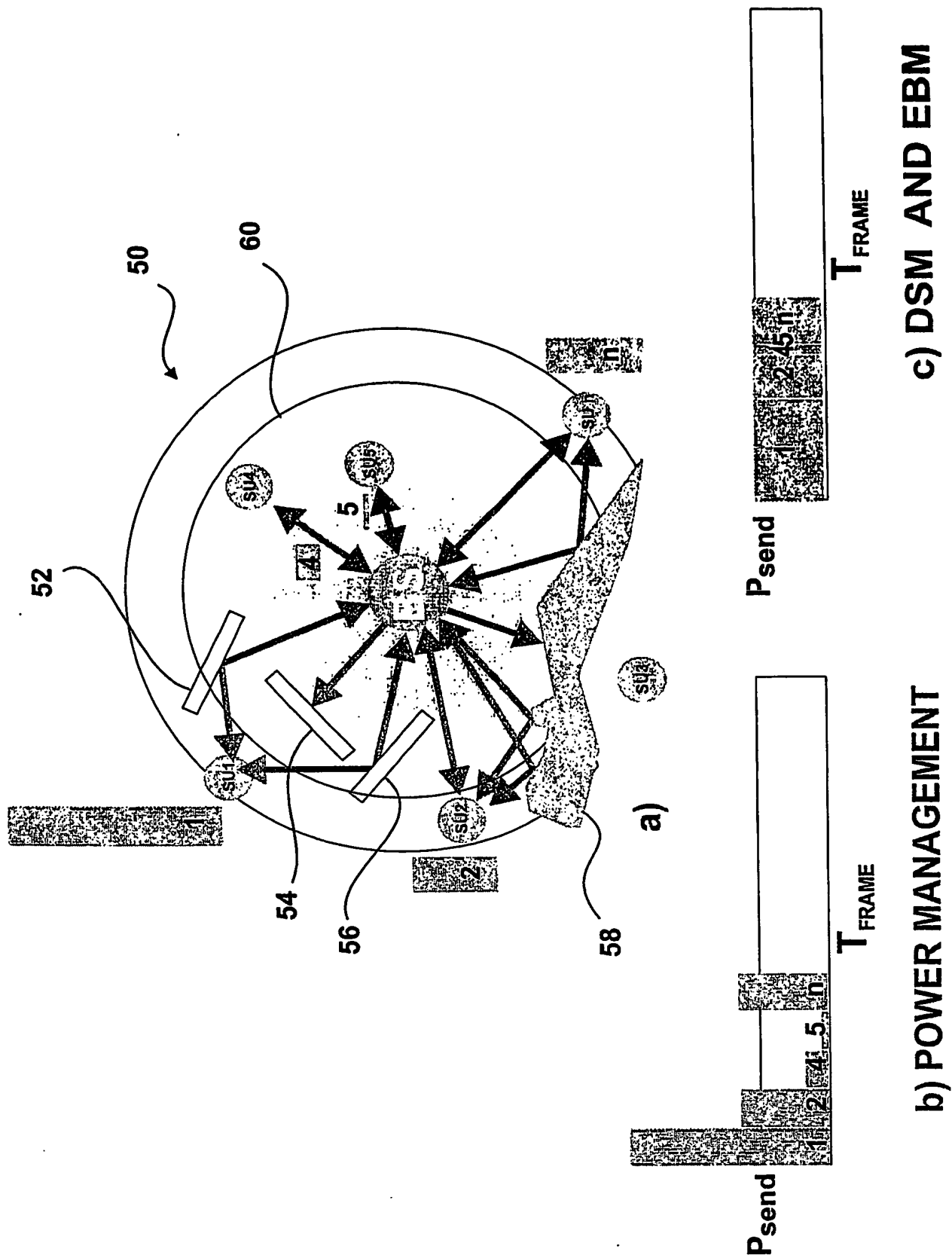


Fig. 4

EBM

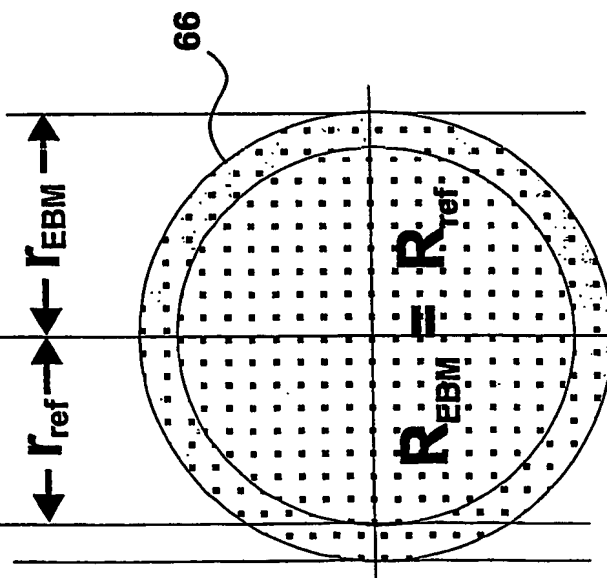
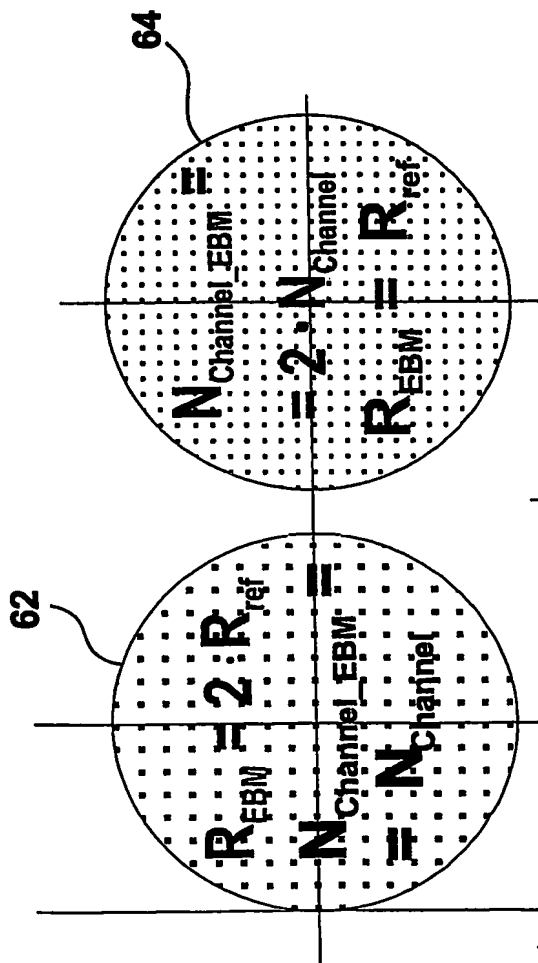
$$N_{\text{Channel_EBM}} = 2 \cdot N_{\text{Channel}}$$

$$N_{\text{Channel}}$$

EBM

$$R_{\text{EBM}} = 2 \cdot R_{\text{ref}}$$

$$R_{\text{ref}}$$



$$N_{\text{Channel_EBM}} = 1.41 \cdot N_{\text{Channel}}$$

$$N_{\text{Channel}}$$

$$R_{\text{EBM}} = 1.2 \cdot R_{\text{ref}}$$

$$R_{\text{ref}}$$

Fig. 5

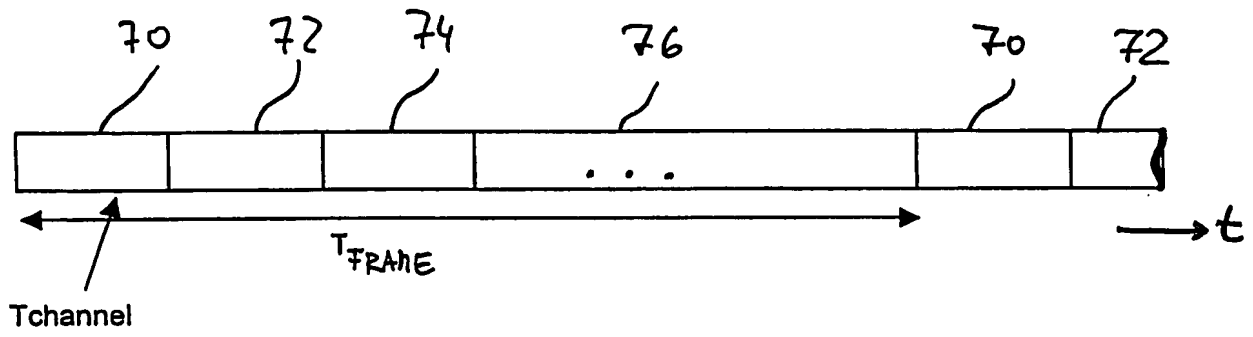


Fig. 6

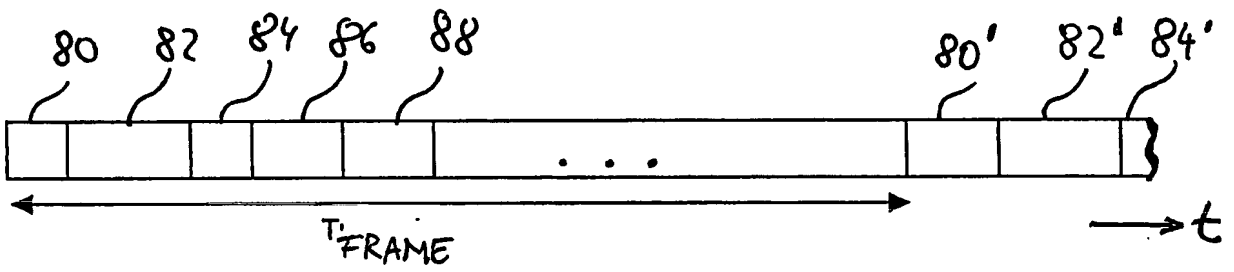


Fig. 7

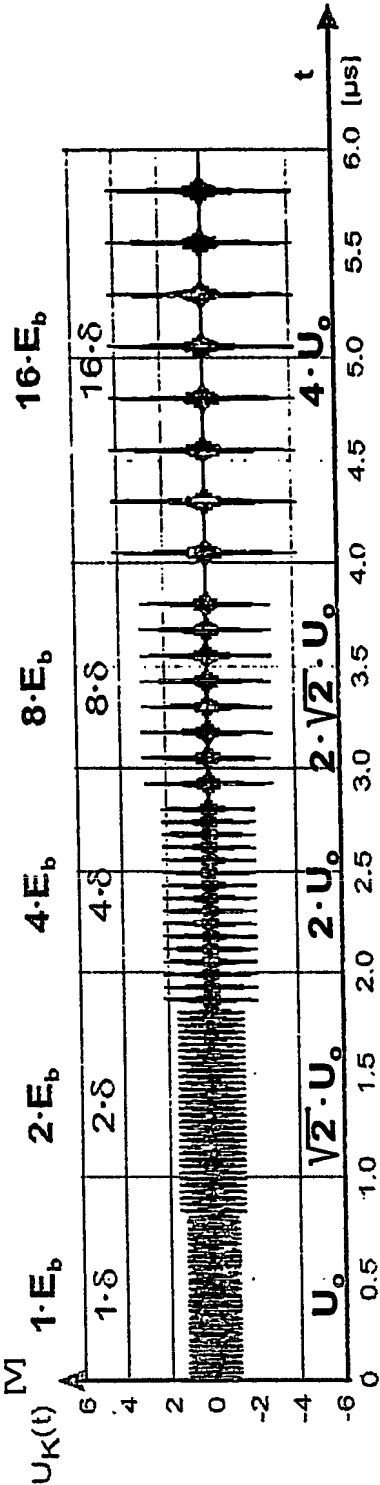


Fig. 8a

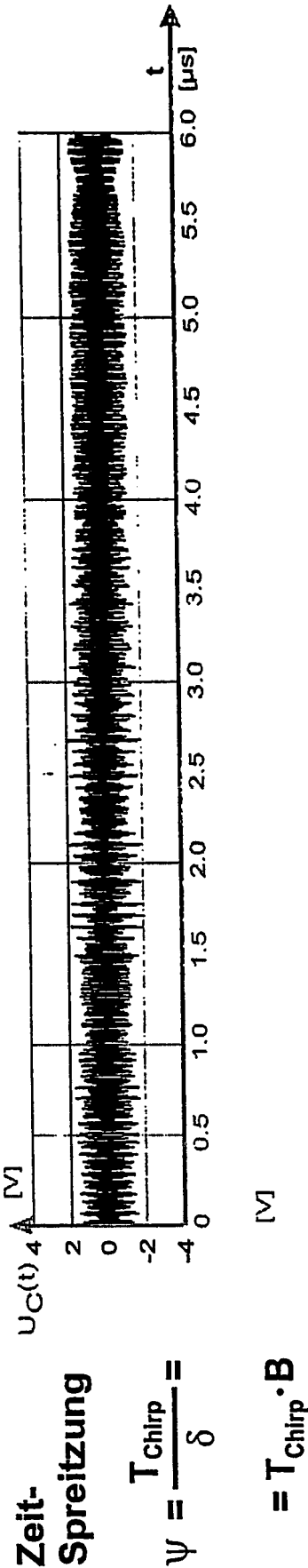


Fig. 8b

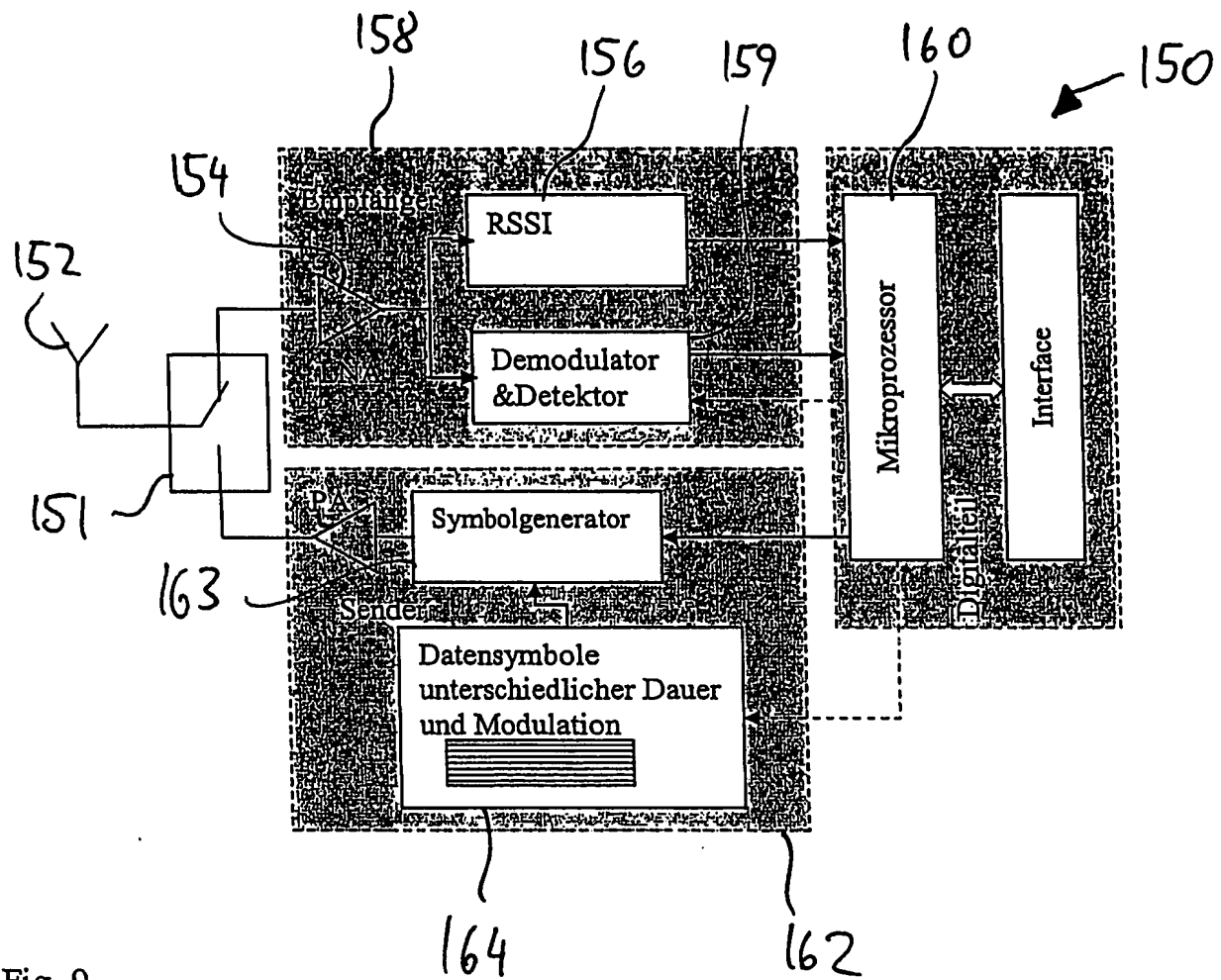


Fig. 9

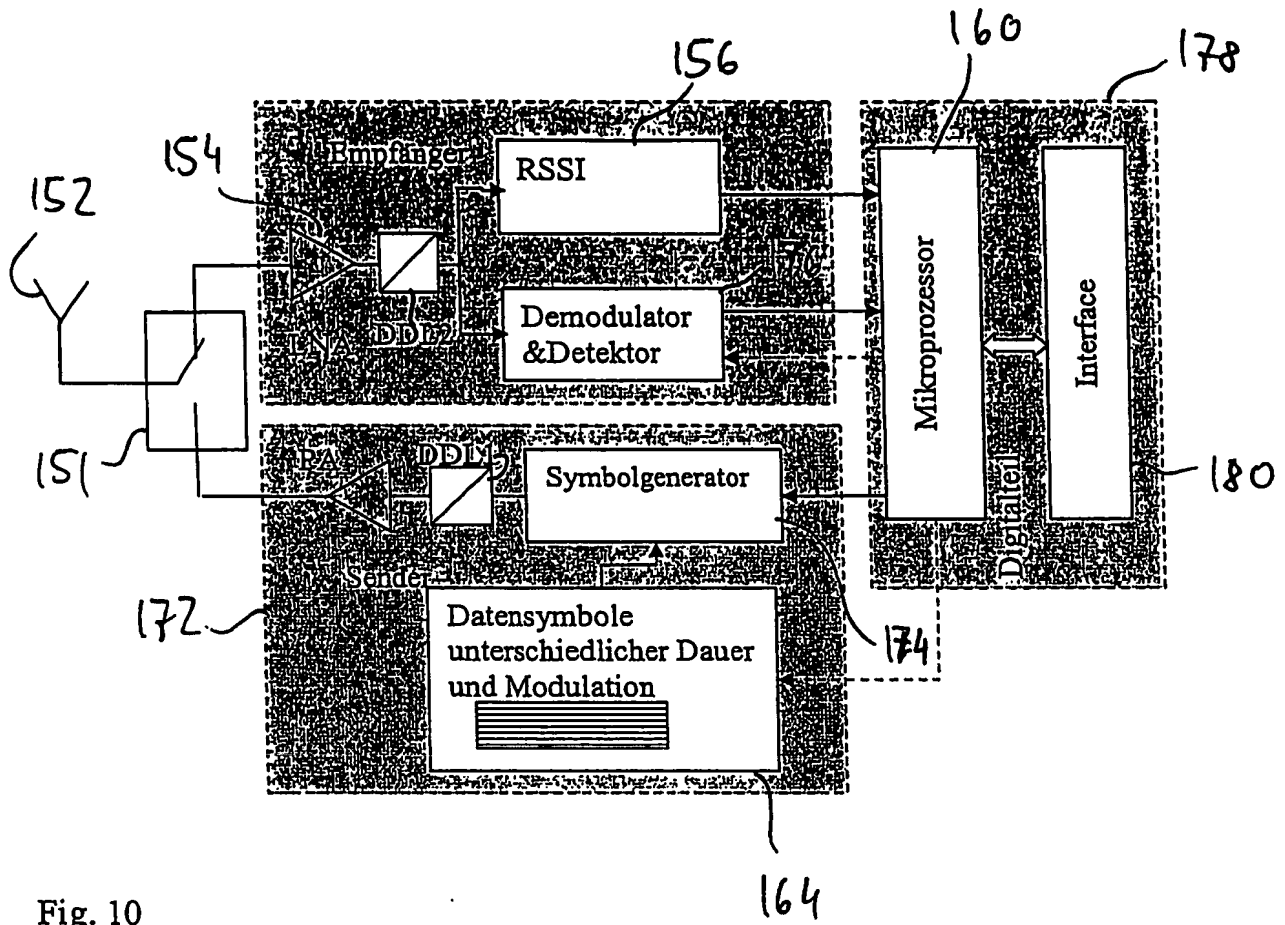


Fig. 10

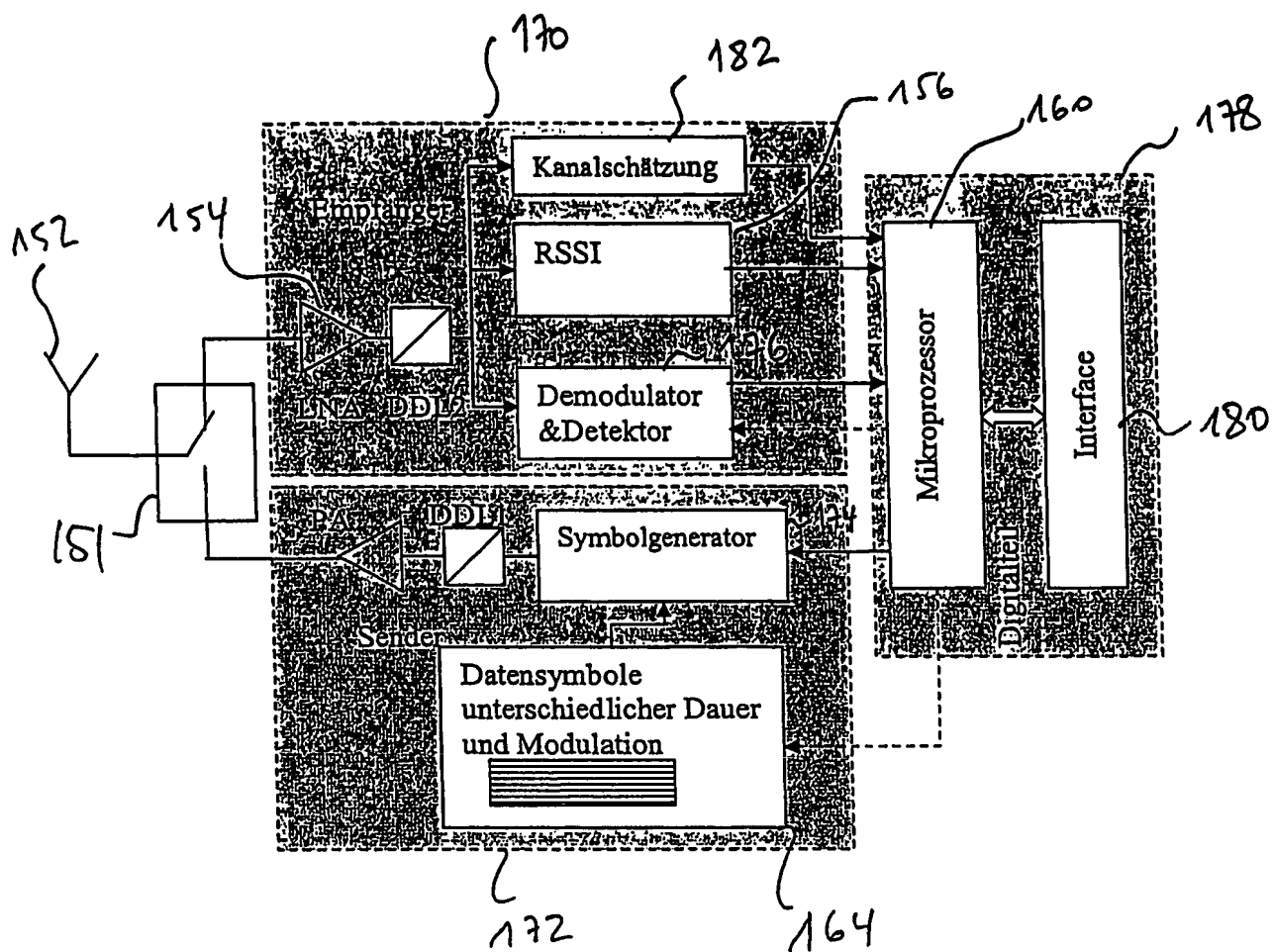
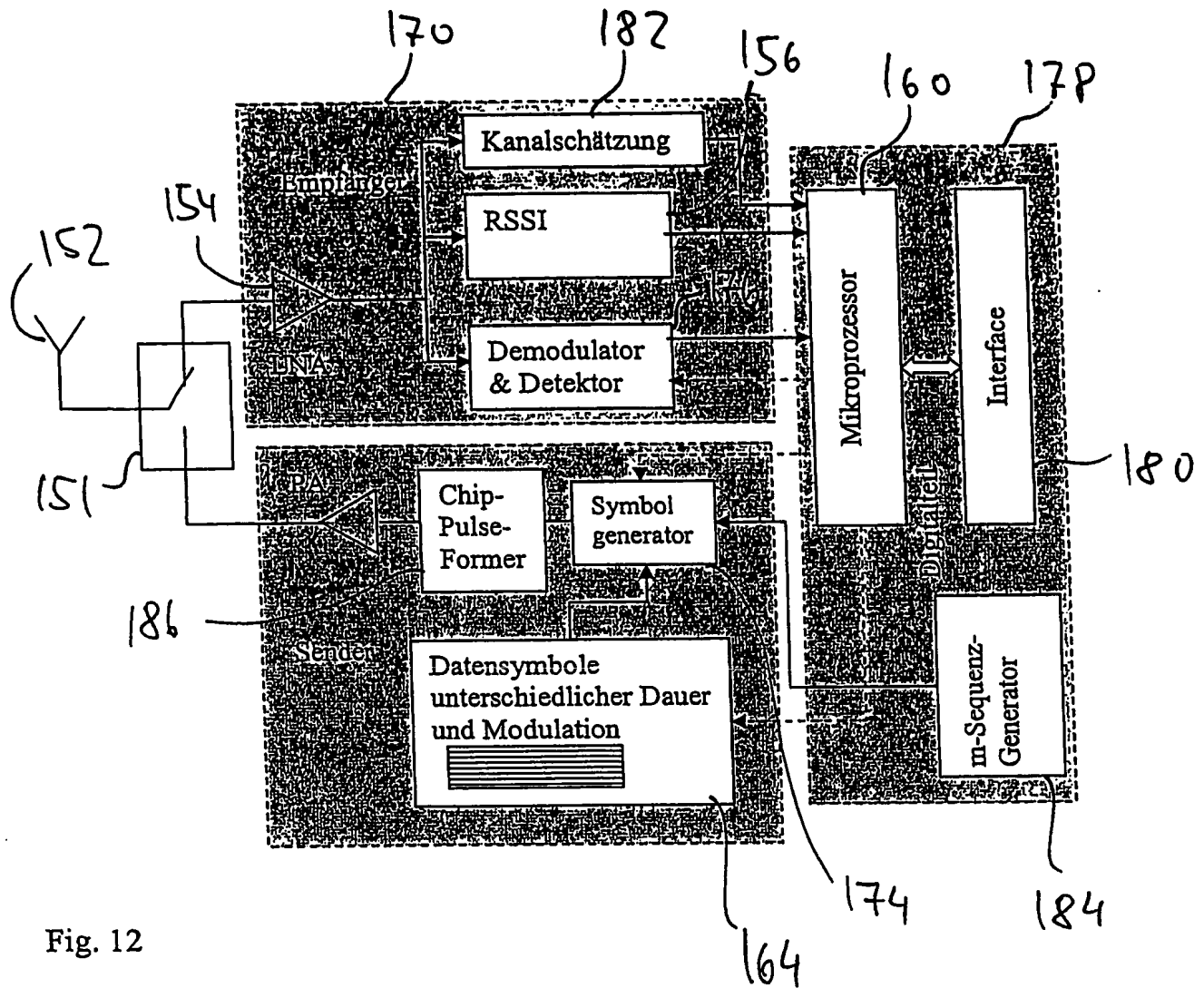


Fig. 11



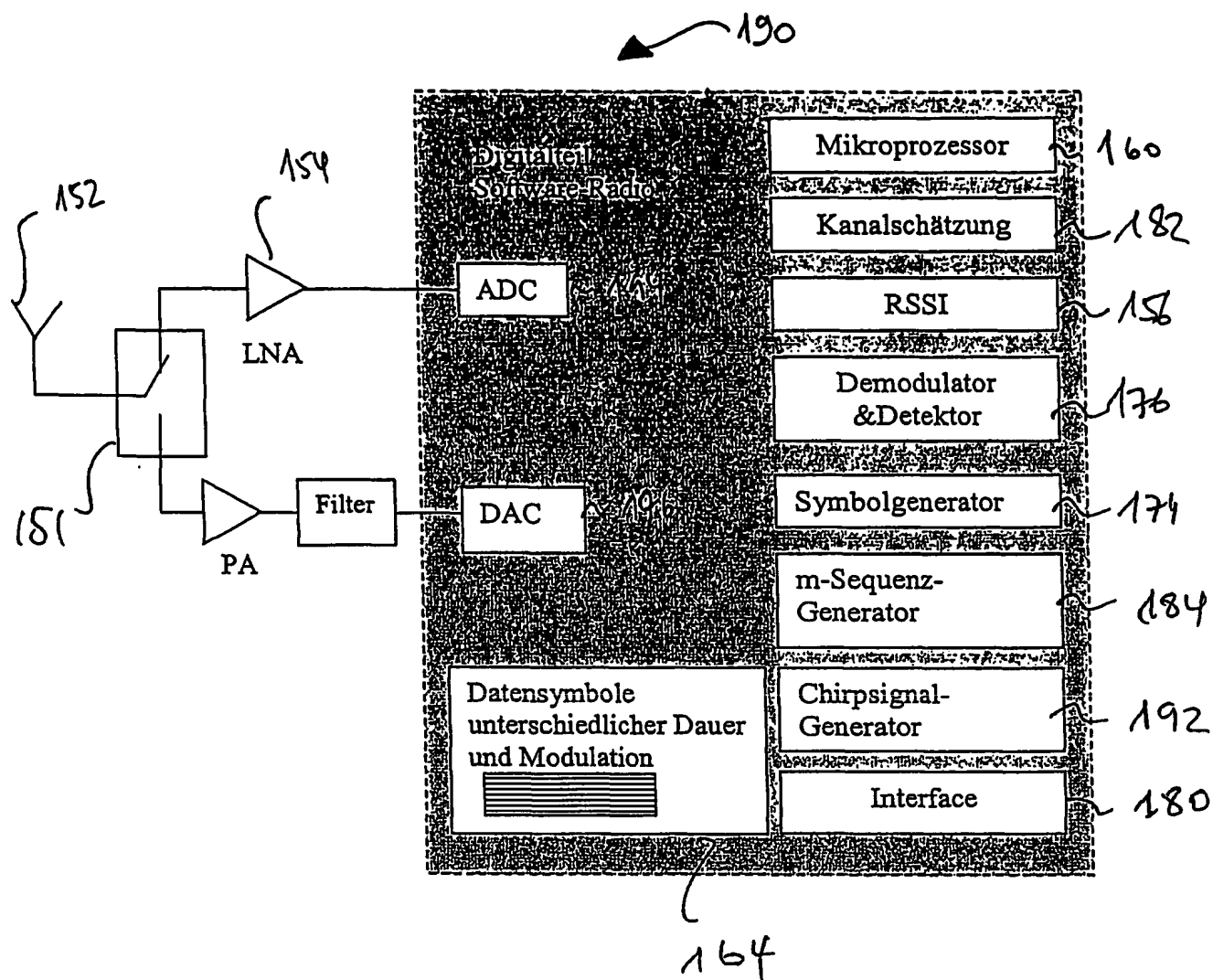


Fig. 13